



Naila Sofia Pereira Jamú

Licenciada em Ciências da Engenharia Civil

**Desenvolvimento e caracterização de argamassas
de cal aérea e terra
A influência da terra como ligante**

Dissertação para obtenção do Grau Mestre em
Engenharia Civil – Perfil de Construção

Orientadora: Maria Paulina Faria Rodrigues, Professora Associada,
Faculdade de Ciências e Tecnologias da Universidade Nova de Lisboa

Júri:

Presidente: Professor Doutor António Manuel Pinho Ramos

Arguente: Doutora Maria do Rosário Veiga

Vogal: Professora Doutora Maria Paulina Santos Forte de Faria Rodrigues



FACULDADE DE
CIÊNCIAS E TECNOLOGIA
UNIVERSIDADE NOVA DE LISBOA

Junho de 2013

‘Copyright’ Naila Sofia Pereira Jamú, FCT/UNL e UNL

A Faculdade de Ciências e Tecnologia e a Universidade Nova de Lisboa têm o direito, perpétuo e sem limites geográficos, de arquivar e publicar esta dissertação através de exemplares impressos reproduzidos em papel ou de forma digital, ou por qualquer outro meio conhecido ou que venha a ser inventado, e de a divulgar através de repositórios científicos e de admitir a sua cópia e distribuição com objetivos educacionais ou de investigação, não comerciais, desde que seja dado crédito ao autor e editor.

AGRADECIMENTOS

Concluída esta etapa da minha vida, umas das que se encaixa na minha realização pessoal, não podia deixar de agradecer a todos aqueles que fizeram parte deste percurso pessoal e acadêmico e contribuíram de alguma forma para que chegasse até aqui.

Em primeiro lugar gostaria de agradecer à minha orientadora, Professora Doutora Paulina Faria, pela excelente orientação que, com a sua exigência, conhecimento, disponibilidade permanente e vontade de querer sempre mais e melhor, me proporcionou uma experiência enriquecedora com a realização do presente trabalho.

Gostaria de agradecer ao Engenheiro Vítor Silva pelo acompanhamento do trabalho experimental e pelo apoio e esclarecimento de dúvidas sempre que estas surgiram. A sua ajuda facilitou a compreensão e execução dos ensaios realizados.

À Mestre Idália Gomes e à Sorgila pela disponibilização da terra, à Lusical pela disponibilização da cal aérea e ao projeto LIMECONTECH pelo apoio à campanha experimental.

À Inês Dias, amiga e companheira dentro e fora da vida académica. Queria agradecer a ajuda e cooperação neste trabalho mas acima de tudo a amizade e confiança que revelou desde o primeiro ano da faculdade, sem as quais estes 5 anos não teriam tido o mesmo encanto.

Ao meu namorado Miguel Santos por todo o amor, apoio, confiança, amizade e sobretudo paciência e compreensão, demonstrados ao longo destes anos, tanto dentro como fora da vida académica. A força transmitida foi sempre essencial em todo o meu percurso.

O meu agradecimento vai também para todos os meus amigos, dentro e fora da faculdade, que com os momentos de estudo, de diversão, de partilha do cansaço e também do descanso, estão sempre presentes para acompanhar cada momento à sua maneira. Cada um deles tem a sua contribuição ao tornar o meu dia-a-dia mais completo.

Finalmente, agradeço à minha família, em especial aos meus pais. Ao meu pai Carlos, pela insistência nos estudos, pelos ensinamentos e por me incentivar a nunca desistir, e à minha mãe Leonor, pelo apoio incondicional, pela confiança e amizade transmitidas. Os seus conselhos contribuíram para me tornar a pessoa que hoje sou.

RESUMO

As argamassas são muito importantes na reabilitação devido às suas múltiplas utilizações e têm de apresentar características compatíveis com os suportes. Os fatores negativos que têm vindo a ser descobertos relativamente ao uso do cimento estão a incentivar o estudo de materiais mais tradicionais e também mais sustentáveis. A incorporação de terra argilosa nas argamassas de cal aérea insere-se numa vertente ainda sistematicamente pouco conhecida e a necessitar de trabalhos de investigação, que pode potenciar particularmente a sua aplicação na reabilitação e em construções de terra.

No presente estudo foram formuladas cinco argamassas distintas, partindo de um traço volumétrico 1:2, com diferentes percentagens de incorporação de terra argilosa como substituição parcial do ligante (cal aérea). Realizaram-se caracterizações às argamassas no estado fresco e no estado endurecido, após cura em condições de referência em laboratório com aspersão nos primeiros 4 dias de idade, em provetes correntes de argamassa e em aplicações sobre tijolo. A argamassa de referência sem terra e uma das argamassas com terra foram também aplicadas e ensaiadas num murete de taipa previamente caracterizado. Os ensaios decorreram, na generalidade, aos 90 dias de cura, mas as aplicações em suporte de tijolo também foram ensaiadas aos 28 dias de cura.

Observou-se que pequenas quantidades de terra argilosa melhoram a trabalhabilidade e aplicabilidade das argamassas e, para além de vantagens ecológicas e económicas, trazem vantagens em termos de resistências, em relação à argamassa de referência de cal aérea. A condutibilidade térmica é afetada negativamente mas há melhorias na absorção de água (capilar e sob baixa pressão). Verificou-se também que quantidades muito elevadas de terra argilosa comprometem o comportamento das argamassas em relação à maioria dos parâmetros estudados.

Termos chave: sustentabilidade, cal aérea hidratada, terra argilosa, taipa, argamassa, reboco, caracterização.

ABSTRACT

Mortars are extremely important in rehabilitation, thanks to their multiple utilities, and need to present matching characteristics with the supports. The negative factors that have been discovered regarding the use of cement, since for decades, are encouraging the study of more traditional and more sustainable materials. The incorporation of clayish earth on the air lime mortars is a process still little systematically known and needing research work, which can boost particularly its application both for rehabilitation and in earth construction.

In this study five distinct mortars were formulated, based on a volumetric dash of 1:2, with different incorporation percentages of clayish earth, as a partial substitute of the binder. The mortars were characterized on the fresh state and on the hardened state, after a curing in laboratorial reference conditions, with water spray on the first 4 days of age, on current test specimens of mortars and on brick applications. The reference mortar without earth and one of the mortars with earth were also applied and tested on a rammed earth wall previously characterized. The characterization was developed, generally, at 90 days of curing, but the applications on a brick support were also tested at 28 days of curing.

The study showed that small amounts of clayish earth improve the workability and applicability of the mortars and bring improvements not only in ecological and economic aspects but also in terms of resistances, comparing to the reference air lime mortar. The thermal conductivity is negatively affected, but there are improvements in water absorption (capillary and under low pressure). The study also showed that high quantities of clayish earth compromise the behavior of the mortars face to most of the studied parameters.

Keywords: sustainability, hydrated air lime, clayish earth, rammed earth, mortar, rendering, characterization.

ÍNDICE

1. INTRODUÇÃO.....	1
1.1. MOTIVAÇÃO E ENQUADRAMENTO DO TEMA.....	1
1.2. OBJETIVOS E METODOLOGIA.....	2
1.3. PLANO E ESTRUTURA DO TRABALHO.....	3
2. ESTADO DO CONHECIMENTO.....	5
2.1. SUSTENTABILIDADE NA CONSTRUÇÃO	5
2.2. CONTEXTO HISTÓRICO SOBRE A UTILIZAÇÃO DE TERRA.....	5
2.3. MATÉRIAS-PRIMAS	7
2.3.1. <i>Terra e argamassas</i>	7
2.3.2. <i>Cal aérea e argamassas</i>	8
2.4. ARGAMASSAS DE CAL AÉREA E TERRA.....	9
2.5. EXIGÊNCIAS FUNCIONAIS DAS ARGAMASSAS	10
3. PLANIFICAÇÃO DA CAMPANHA EXPERIMENTAL	15
3.1. INTRODUÇÃO.....	15
3.2. CARACTERIZAÇÃO DOS SUPORTES.....	15
3.3. CARACTERIZAÇÃO DOS CONSTITUINTES	16
3.4. CARACTERIZAÇÃO DAS ARGAMASSAS NO ESTADO FRESCO	16
3.5. CARACTERIZAÇÃO DAS ARGAMASSAS NO ESTADO ENDURECIDO	17
4. MATERIAIS CONSTITUINTES DAS ARGAMASSAS	21
4.1. ÁGUA A AREIA	21
4.2. TERRA ARGILOSA.....	22
4.3. CAL AÉREA.....	23
5. CARACTERIZAÇÃO DOS SUPORTES E DOS CONSTITUINTES.....	25
5.1. MURETE DE TAIPA.....	25
5.1.1. <i>Resistência superficial por esclerómetro pendular</i>	25
5.1.2. <i>Condutibilidade térmica</i>	26
5.1.3. <i>Absorção de água sob baixa pressão por tubos de Karsten</i>	27
5.2. TIJOLO FURADO DE 7 CM	28
5.2.1. <i>Condutibilidade térmica</i>	28
5.2.2. <i>Absorção de água sob baixa pressão por tubos de Karsten</i>	28
5.3. CARACTERIZAÇÃO DOS CONSTITUINTES	28
5.3.1. <i>Baridade</i>	29
5.3.2. <i>Análise granulométrica</i>	30

6. PREPARAÇÃO DAS ARGAMASSAS, CARACTERIZAÇÃO NO ESTADO FRESCO, PROVETES E CURA.....	33
6.1. AMASSADURAS	33
6.2. ENSAIOS ÀS ARGAMASSAS NO ESTADO FRESCO.....	34
6.2.1. <i>Consistência por espalhamento</i>	34
6.2.2. <i>Massa volúmica</i>	35
6.2.3. <i>Teor de ar incorporado</i>	36
6.2.4. <i>Retenção de água</i>	37
6.3. PREPARAÇÃO DOS PROVETES DE ARGAMASSA E CONDIÇÕES DE CURA	39
7. CARACTERIZAÇÃO DAS ARGAMASSAS NO ESTADO ENDURECIDO	43
7.1.1. <i>Provetes em suporte de tijolo (28 e 90 dias)</i>	43
7.1.1.1 <i>Dureza superficial por durómetro Shore A</i>	43
7.1.1.2 <i>Condutibilidade térmica</i>	43
7.1.1.3 <i>Velocidade de propagação dos ultrassons</i>	44
7.1.1.4 <i>Absorção de água sob baixa pressão por tubos de Karsten</i>	45
7.1.1.5 <i>Porosimetria e porosidade aberta de mercúrio</i>	45
7.1.2. <i>Provetes prismáticos (90 dias)</i>	46
7.1.2.1 <i>Massa volúmica</i>	47
7.1.2.2 <i>Condutibilidade térmica</i>	47
7.1.2.3 <i>Módulo de elasticidade dinâmico (por equipamento específico)</i>	48
7.1.2.4 <i>Resistência à tração por flexão e à compressão</i>	49
7.1.2.5 <i>Porosidade aberta e massa volúmica aparente</i>	50
7.1.2.6 <i>Absorção de água por capilaridade</i>	52
7.1.2.7 <i>Secagem</i>	54
7.1.2.8 <i>Porosimetria de mercúrio</i>	55
7.1.2.9 <i>Resistência aos sulfatos</i>	56
7.1.3. <i>Provetes em suporte de taipa (90 dias)</i>	57
7.1.3.1 <i>Dureza superficial por durómetro Shore A</i>	57
7.1.3.2 <i>Resistência superficial por esclerómetro pendular</i>	57
7.1.3.3 <i>Velocidade de propagação dos ultrassons</i>	57
7.1.3.4 <i>Absorção de água sob baixa pressão por tubos de Karsten</i>	58
7.1.3.5 <i>Porosimetria de mercúrio</i>	58
8. APRESENTAÇÃO E ANÁLISE DOS RESULTADOS	59
8.1. CARACTERÍSTICAS DOS SUPORTES.....	59
8.1.1. <i>Murete de taipa</i>	59
8.1.1.1 <i>Resistência superficial por esclerómetro pendular</i>	59
8.1.1.2 <i>Condutibilidade térmica</i>	60
8.1.1.3 <i>Absorção de água sob baixa pressão por tubos de Karsten</i>	60
8.1.2. <i>Tijolo de 7 cm</i>	61

8.1.2.1	Condutibilidade térmica.....	61
8.1.2.2	Absorção de água sob baixa pressão por tubos de Karsten.....	61
8.2.	CARACTERÍSTICAS DOS CONSTITUINTES DAS ARGAMASSAS E COMPOSIÇÕES DAS ARGAMASSAS.....	62
8.3.	CARACTERÍSTICAS DAS ARGAMASSAS	64
8.3.1.	Características no estado fresco.....	64
8.3.1.1	Consistência por espalhamento.....	64
8.3.1.2	Massa volúmica	65
8.3.1.3	Teor de ar	66
8.3.1.4	Retenção de água.....	67
8.3.1.5	Conclusões preliminares – avaliação da aplicabilidade e da retração de secagem inicial.....	68
8.3.2.	Características das argamassas aplicadas no suporte de tijolo.....	68
8.3.2.1	Dureza superficial por durómetro Shore A (28 dias e 90 dias) das argamassas sobre tijolo.....	68
8.3.2.2	Condutibilidade térmica (28 e 90 dias) das argamassas sobre tijolo	69
8.3.2.3	Velocidade de propagação dos ultrassons (28 e 90 dias) nas argamassas sobre tijolo.....	70
8.3.2.4	Absorção de água sob baixa pressão por tubos de Karsten (28 e 90 dias) sobre tijolo.....	71
8.3.2.5	Porosimetria de mercúrio de argamassas sobre tijolo	74
8.3.2.6	Conclusões preliminares.....	76
8.3.3.	Características dos rebocos de argamassas aplicadas no murete	76
8.3.3.1	Dureza superficial por durómetro Shore A dos rebocos do murete	76
8.3.3.2	Resistência superficial por esclerómetro pendular dos rebocos do murete	77
8.3.3.3	Velocidade de propagação dos ultrassons do reboco do murete	77
8.3.3.4	Absorção de água sob baixa pressão por tubos de Karsten dos reboco no murete.....	78
8.3.3.5	Porosimetria de mercúrio de amostras de rebocos do murete.....	79
8.3.3.6	Conclusões preliminares.....	81
8.3.4.	Características das argamassas através dos provetes prismáticos.....	81
8.3.4.1	Massa volúmica das argamassas	81
8.3.4.2	Condutibilidade térmica das argamassas	82
8.3.4.3	Módulo de elasticidade dinâmico das argamassas.....	83
8.3.4.4	Resistência à tração por flexão e à compressão das argamassas	83
8.3.4.5	Porosidade aberta e massa volúmica aparente das argamassas.....	84
8.3.4.6	Porosimetria de mercúrio das argamassas.....	85
8.3.4.7	Absorção de água por capilaridade das argamassas	86
8.3.4.8	Secagem das argamassas.....	88
8.3.4.9	Resistência aos sulfatos das argamassas	89

8.3.4.10	Conclusões preliminares	90
9.	DISCUSSÃO DOS RESULTADOS	91
9.1.	COMPARAÇÃO ENTRE SUPORTES	93
9.2.	COMPARAÇÃO DE RESULTADOS NO ESTADO FRESCO	93
9.3.	COMPARAÇÃO DE RESULTADOS NO ESTADO ENDURECIDO	97
10.	CONCLUSÕES	117
10.1.	CONSIDERAÇÕES FINAIS	117
10.2.	PROPOSTAS DE DESENVOLVIMENTO FUTURO.....	119
	BIBLIOGRAFIA	121
ANEXOS I		
A.1	RESULTADOS OBTIDOS NO ENSAIO DE ESPALHAMENTO DAS ARGAMASSAS.....	I
A.2	RESULTADOS OBTIDOS NO ENSAIO DA MASSA VOLÚMICA FRESCA.....	II
A.3	RESULTADOS OBTIDOS NO ENSAIO DO TEOR DE AR DAS ARGAMASSAS FRESCAS	II
A.4	RESULTADOS OBTIDOS NO ENSAIO DA RETENÇÃO DE ÁGUA DAS ARGAMASSAS FRESCAS.....	III
A.5	RESULTADOS OBTIDOS NO ENSAIO DE DUREZA SUPERFICIAL, AOS 28 DIAS E AOS 90 DIAS DAS ARGAMASSAS SOBRE TIJOLO	III
A.6	RESULTADOS OBTIDOS NO ENSAIO DE CONDUTIBILIDADE TÉRMICA DOS PROVETES DE ARGAMASSA EM SUPORTE DE TIJOLO	IV
A.7	RESULTADOS OBTIDOS NO ENSAIO DE VELOCIDADE DE PROPAGAÇÃO DE ULTRASSONS DAS ARGAMASSAS SOBRE TIJOLO	V
A.8	RESULTADOS OBTIDOS NO ENSAIO DE ABSORÇÃO DE ÁGUA SOB BAIXA PRESSÃO DAS ARGAMASSAS SOBRE TIJOLO	VI
A.9	RESULTADOS OBTIDOS NO ENSAIO DE CONDUTIBILIDADE TÉRMICA DOS PROVETES PRISMÁTICOS.....	X
A.10	RESULTADOS OBTIDOS NO ENSAIO DO MÓDULO DE ELASTICIDADE DINÂMICO.....	XI
A.11	RESULTADOS OBTIDOS NO ENSAIO DE RESISTÊNCIA À TRAÇÃO (POR FLEXÃO) E À COMPRESSÃO.....	XIII
A.12	RESULTADOS OBTIDOS NO ENSAIO DE POROSIDADE ABERTA E MASSA VOLÚMICA APARENTE PELO MÉTODO HIDROSTÁTICO	XIV
A.13	RESULTADOS OBTIDOS NO ENSAIO DE ABSORÇÃO DE ÁGUA POR CAPILARIDADE	XV
A.14	RESULTADOS OBTIDOS NO ENSAIO DE SECAGEM.....	XVI
A.15	RESULTADOS OBTIDOS NO ENSAIO DE POROSIMETRIA DE MERCÚRIO	XVII
A.16	RESULTADOS OBTIDOS NO ENSAIO DE RESISTÊNCIA AOS SULFATOS	XXI
A.17	POSTER, RESUMO DO CIHEL E ARTIGO ACEITE NO CONGRESSO CIAV2013.....	XXV

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 4.1 – Areias APAS12, APAS20 e APAS30.....	21
Figura 4.2 – Curva granulométrica das areias e da mistura de areias	22
Figura 4.3 – Terra.....	22
Figura 4.4 – Análise granulométrica das amostras de terra por via húmida (Gomes <i>et al.</i> , 2012d)	23
Figura 4.5 – Cal aérea (CL) da Lusical.....	23
Figura 5.1 – Ensaio de dureza superficial (esclerómetro)	25
Figura 5.2 – Ensaio de condutibilidade térmica ao murete de taipa. A) Disposição do equipamento; b) Equipamento ISOMET 2104 (Heat Transfer Analyser); c) Furação dos pontos a ensaiar; d) Sonda de profundidade	26
Figura 5.3 – Ensaio de absorção de água sob baixa pressão.....	27
Figura 5.4 – Ensaio de absorção de água sob baixa pressão ao tijolo	28
Figura 5.5 – a) Equipamento para o ensaio da massa volúmica; b) Material introduzido por gravidade no recipiente	29
Figura 5.6 – a) Crivos de malha quadrada e máquina de vibração horizontal; b) Colocação do material no peneiro de malha superior	30
Figura 6.1 – Introdução de água na cuba (em laboratório e no exterior).....	34
Figura 6.2 – a) Mesa de espalhamento e molde cónico; b) Molde com argamassa; c) Medição do diâmetro de espalhamento	35
Figura 6.3 – a) Molde com argamassa; b) Pesagem do conjunto	36
Figura 6.4 – Equipamento para determinação do teor de ar	37
Figura 6.5 – a) Molde com argamassa; b) Preparação do conjunto para o ensaio; c) Conjunto invertido com um peso de 2kg.....	38
Figura 6.6 – Moldes prismáticos.....	39
Figura 6.7 – a) Tijolo no primeiro molde; b) Aspersão do tijolo; c) Aplicação da argamassa com o segundo molde; d) Rasagem da argamassa; e) Tijolo preparado para iniciar a cura.....	40
Figura 6.8 – a) Aspersão dos provetes prismáticos; b) Aspersão do provete em suporte de tijolo	41
Figura 6.9 – Aplicação do reboco no murete de taipa	41
Figura 7.1 – a) Durómetro Shore A; b) Medição com o durómetro.....	43
Figura 7.2 – Equipamento para a realização do ensaio de condutibilidade térmica: ensaio à argamassa aplicada aos tijolos.....	44
Figura 7.3 – a) Equipamento de medição dos ultrassons; b) Marcação dos pontos a ensaiar; c) Medição através dos transdutores.....	44
Figura 7.4 – Ensaio de absorção de água sob baixa pressão em argamassa aplicada no tijolo.....	45
Figura 7.5 – Ensaio de porosimetria de mercúrio: a) corte da amostra retirada do suporte de tijolo; b) porosímetro “Autopore IV” da Micometrics; c) penetrómetro	46
Figura 7.6 – Esquema de ensaios aos prismas.....	47

Figura 7.7 – a) Material utilizado na desmoldagem; b) Provete após a desmoldagem	47
Figura 7.8 – Ensaio de condutibilidade térmica aos provetes prismáticos	48
Figura 7.9 – a) Equipamento “ZEUS Resonance Meter”; b) Medição do módulo de elasticidade dinâmico.....	48
Figura 7.10 – a) Equipamento de medição das resistências mecânicas; b) Ensaio de resistência à tração por flexão; c) Ensaio de resistência à compressão	50
Figura 7.11 – Ensaio de porosidade aberta e massa volúmica aparente. A) Equipamento; b) Provete submerso; c) Disposição dos provetes.....	51
Figura 7.12 – a) Balança de pesagem corrente e pesagem hidrostática; b) Pesagem dos provetes saturados; c) Pesagem hidrostática	51
Figura 7.13 – Ensaio de capilaridade. A) Provete com película aderente, gaze e elástico; b) Pesagem dos provetes durante o ensaio; c) Disposição dos provetes	53
Figura 7.14 – Provete durante o ensaio de secagem.....	54
Figura 7.15 – Preparação das amostras para o ensaio de porosimetria de mercúrio	56
Figura 7.16 – Ensaio de resistência aos sulfatos.....	56
Figura 7.17 – Ensaio de resistência superficial do reboco aplicado ao murete (90 dias).....	57
Figura 7.18 – Pontos de ensaio da velocidade de propagação dos ultrassons do reboco aplicado ao murete, aos 90 dias.....	58
Figura 7.19 – Ensaio de absorção de água sob baixa pressão – tubos de Karsten, do reboco aplicado ao murete, aos 90 dias	58
Figura 8.1 – Ensaio de resistência superficial – esquema de pontos ensaiados no murete de taipa.....	59
Figura 8.2 – Aspeto depois do ensaio.....	59
Figura 8.3 – Ensaio de condutibilidade térmica – esquema de pontos ensaiados no murete de taipa.....	60
Figura 8.4 – Ensaio de absorção de água sob baixa pressão – esquema de pontos ensaiados no murete de taipa	61
Figura 8.5 – Resultados dos tubos de Karsten no murete de taipa	61
Figura 8.6 – Curvas granulométricas da terra, a seco e a húmido.....	63
Figura 8.7 – Curvas granulométricas (APAS12, APAS20, APAS30, Mistura de areias, Terra)	64
Figura 8.8 – Resultados da consistência por espalhamento das argamassas no estado fresco	65
Figura 8.9 – Resultados da massa volúmica das argamassas no estado fresco.....	66
Figura 8.10 – Resultados do teor de ar das argamassas no estado fresco	66
Figura 8.11 – Resultados da retenção de água das argamassas no estado fresco.....	67
Figura 8.12 – Resultados da dureza superficial por durómetro das argamassas aplicadas em suporte de tijolo (28 e 90 dias).....	69
Figura 8.13 – Resultados da condutibilidade térmica das argamassas aplicadas no suporte de tijolo (28 e 90 dias)	70
Figura 8.14 – Resultados da velocidade de propagação dos ultrassons das argamassas aplicadas em suporte de tijolo (28 e 90 dias)	71

Figura 8.15 – Quantidade de água absorvida aos 28 dias (tubos de Karsten).....	71
Figura 8.16 – Quantidade de água absorvida aos 90 dias (tubos de Karsten).....	72
Figura 8.17 – Período de tempo para absorver 4 ml de água aos 28 dias.....	72
Figura 8.18 – Tempo para absorver 4 ml de água aos 90 dias	73
Figura 8.19 – Aspeto do revestimento sobre o tijolo durante o ensaio de absorção de água sob baixa pressão (CL2_50t(L)), aos 28 dias.....	73
Figura 8.20 – Percentagem de incremento de mercúrio nas argamassas aplicadas em suporte de tijolo, aos 90 dias.....	74
Figura 8.21 – Percentagem de mercúrio incrementada cumulativa, das argamassas aplicadas em suporte de tijolo, aos 90 dias.....	75
Figura 8.22 – Porosidade aberta (porosímetro de mercúrio), das argamassas aplicadas em suporte de tijolo, aos 90 dias.....	75
Figura 8.23 – Absorção de água sob baixa pressão dos rebocos de argamassas aplicados no murete de taipa, aos 90 dias	78
Figura 8.24 – Tempo que os rebocos de argamassa aplicados no murete de taipa demoram a absorver 4 ml de água, aos 90 dias.....	79
Figura 8.25 – Percentagem de incremento de mercúrio nos rebocos de argamassa aplicados no murete de taipa (90 dias).....	79
Figura 8.26 – Percentagem de mercúrio incrementada acumulativa, das argamassas aplicadas no murete (90 dias)	80
Figura 8.27 – Porosidade aberta (porosímetro de mercúrio) das argamassas aplicadas em suporte de taipa, aos 90 dias.....	80
Figura 8.28 – Massa volúmica das argamassas dos provetes aos 7, 28 e 90 dias de cura	81
Figura 8.29 – Condutibilidade térmica das argamassas nos provetes prismáticos, aos 90 dias	82
Figura 8.30 – Módulo de elasticidade dinâmico das argamassas nos provetes prismáticos.....	83
Figura 8.31 – Resistências à tração e à compressão das argamassas nos provetes prismáticos ..	84
Figura 8.32 – Porosidade aberta e massa volúmica aparente das argamassas nos provetes prismáticos	84
Figura 8.33 – Percentagem de incremento de mercúrio nas argamassas em provetes prismáticos, aos 90 dias	85
Figura 8.34 – Percentagem de mercúrio incrementada cumulativa, das argamassas em provetes prismáticos, aos 90 dias	86
Figura 8.35 – Porosidade aberta (porosimetria de mercúrio) das argamassas dos prismas, aos 90 dias.....	86
Figura 8.36 – Curvas de capilaridade.....	87
Figura 8.37 – Coeficiente de Capilaridade e Valor Assintótico das argamassas em provetes prismáticos	87
Figura 8.38 – Provetes durante o ensaio de capilaridade	88
Figura 8.39 – Curvas de secagem	88
Figura 8.40 – Taxa de Secagem e Índice de Secagem das argamassas em provetes prismáticos	89

Figura 8.41 – Variação de massa das argamassas ao longo dos ciclos do ensaio de resistência aos sulfatos	90
Figura 9.1 – Comparação entre a consistência por espalhamento e a relação a/t	93
Figura 9.2 – Comparação entre a consistência por espalhamento e a relação a/CL	94
Figura 9.3 – Comparação entre o teor de ar e a massa volúmica no estado fresco	95
Figura 9.4 – Comparação entre o teor de ar e a consistência por espalhamento	95
Figura 9.5 – Comparação entre a retenção de água e a consistência por espalhamento	96
Figura 9.6 – Comparação entre a retenção de água e a relação a/t	97
Figura 9.7 – Condutibilidade térmica das argamassas aos 90 dias sobre tijolo e em provetes prismáticos	98
Figura 9.8 – Condutibilidade térmica e a velocidade de propagação dos ultrassons aos 28 e 90 dias	99
Figura 9.9 – Velocidades de propagação dos ultrassons do reboco no murete e da argamassa sobre tijolo, aos 90 dias	99
Figura 9.10 – Coeficientes de absorção de água pelos tubos de Karsten (28 e 90 dias)	100
Figura 9.11 – Absorção de água sob baixa pressão do revestimento sobre tijolo e do reboco no murete, aos 90 dias	101
Figura 9.12 – Período de tempo de absorção de 4 ml de água sob baixa pressão pelo revestimento sobre tijolo e o reboco do murete, aos 90 dias	101
Figura 9.13 – Coeficiente de absorção de água inicial e velocidade de propagação dos ultrassons (28 dias da argamassa no tijolo)	102
Figura 9.14 – Coeficiente de absorção inicial e velocidade de propagação dos ultrassons (90 dias da argamassa no tijolo)	102
Figura 9.15 – Resistências à compressão e tração, e módulo de elasticidade dinâmico	104
Figura 9.16 – Quociente entre a resistência à tração e à compressão	105
Figura 9.17 – Quociente entre o módulo de elasticidade dinâmico e a resistência à tração	105
Figura 9.18 – Porosidade aberta e Resistência à compressão	106
Figura 9.19 – Porosidade aberta pelo método hidrostático e a quantidade de poros de maior dimensão por porosimetria de mercúrio	107
Figura 9.20 – Coeficiente de capilaridade e a Taxa de secagem	108
Figura 9.21 – Valor assíntótico e o Índice de secagem	108
Figura 9.22 – Coeficiente de capilaridade e Porosidade aberta ou total	109
Figura 9.23 – Valor assíntótico e Porosidade aberta ou total	109
Figura 9.24 – Coeficiente de capilaridade e dimensão dos poros das argamassas nos provetes prismáticos	110
Figura 9.25 – Taxa de secagem e Porosidade aberta pelo método hidrostático	110
Figura 9.26 – Índice de secagem e Porosidade aberta pelo método hidrostático	111
Figura 9.27 – Taxa de secagem e Porosimetria dos provetes prismáticos	111
Figura 9.28 – Porosidade aberta pelo método hidrostático e perda de massa por 25 ciclos de ataque por sulfatos	112

Figura 9.29 – Perda de massa por 25 ciclos de ataque dos sulfatos e a porosimetria das argamassas	112
Figura 9.30 – Comparação entre a porosimetria da argamassa CL2, nos diferentes suportes.	113
Figura 9.31 – Comparação entre a porosimetria da argamassa com 25% de terra, nos diferentes suportes.....	113
Figura 9.32 – Comparação entre a porosidade aberta medida pelo método hidrostático e pelo porosímetro de mercúrio, das argamassas dos prismas, aos 90 dias	114

ÍNDICE DE QUADROS

Quadro 2.1 – Exigências funcionais de um reboco para edifícios antigos (Veiga <i>et al.</i> , 2010)	12
Quadro 2.2 – Propriedades de rebocos para revestimentos, norma EN 998-1 (CEN, 2010)	13
Quadro 3.1 – Ensaio de caracterização dos suportes	16
Quadro 3.2 – Ensaio aos constituintes	16
Quadro 3.3 – Ensaio no estado fresco	17
Quadro 3.4 – Ensaio no estado endurecido (suporte de tijolo – 28 e 90 dias de cura)	18
Quadro 3.5 – Ensaio no estado endurecido (prismas – 90 dias de cura)	18
Quadro 3.6 – Ensaio ao reboco aplicado no murete (90 dias de cura)	19
Quadro 4.1 – Bariedades das areias (Carneiro, 2012)	21
Quadro 4.2 – Composição mineralógica das amostras da terra obtidas por DRX (Gomes <i>et al.</i> , 2012d)	22
Quadro 4.3 – Bariedade da cal aérea	23
Quadro 4.4 – Composição química da cal aérea (em % de massa) (Gameiro <i>et al.</i> , 2012)	23
Quadro 6.1 – Quantidades de constituintes utilizados para cada argamassa	33
Quadro 8.1 – Resistência superficial do murete de taipa não rebocado	59
Quadro 8.2 – Condutibilidade térmica do murete de taipa	60
Quadro 8.3 – Bariedades dos constituintes	62
Quadro 8.4 – Traço ponderal das argamassas; Relações água/ligante, água/terra e água/cal aérea	62
Quadro 8.5 – Dureza superficial por durómetro dos rebocos de argamassas aplicadas no murete de taipa (90 dias)	77
Quadro 8.6 – Resistência superficial das argamassas aplicadas no murete de taipa, aos 90 dias	77
Quadro 8.7 – Velocidade de propagação dos ultrassons nas argamassas aplicadas no murete de taipa, aos 90 dias	78
Quadro 9.1 – Resultados médios e desvios-padrão (quando apropriados) das argamassas no estado fresco: Consistência por espalhamento, Massa volúmica, Teor de ar e Retenção de água	91
Quadro 9.2 – Resultados médios e desvios-padrão das argamassas aplicadas no tijolo (28 e 90 dias): Dureza superficial, Condutibilidade térmica e Velocidade de propagação dos ultrassons	91
Quadro 9.3 – Resultados médios e desvios-padrão das argamassas aplicadas no tijolo (28 e 90 dias): Absorção de água sob baixa pressão	91
Quadro 9.4 – Resultados médios e desvios-padrão dos prismas, aos 90 dias: Módulo de elasticidade dinâmico, Resistências à compressão e à tração, Porosidade aberta (método hidrostático), Massa volúmica aparente e Condutibilidade térmica	92
Quadro 9.5 – Resultados médios e desvios-padrão dos prismas, aos 90 dias: Capilaridade (Coeficiente de capilaridade e Valor assintótico), Secagem (Taxa de secagem e Índice de secagem) e Variação de massa aos 25 ciclos de ataque por sulfatos	92
Quadro 9.6 – Resultados da porosidade aberta pelo porosímetro de mercúrio, aos 90 dias	92

Quadro 9.7 – Resumo dos resultados obtidos	115
--	-----

SIMBOLOGIA

Abreviaturas

- CEN – Comité Européen de Normalisation
- DEC – Departamento de Engenharia Civil
- EN – European Norm
- FCT-UNL – Faculdade de Ciências e Tecnologia da Universidade Nova de Lisboa
- IPQ – Instituto Português da Qualidade, I.P.
- LNEC – Laboratório Nacional de Engenharia Civil
- NP – Norma Portuguesa

Argamassas

- CL2 – argamassa de cal aérea e areia ao traço volumétrico 1:2
- CL2_5t(L) – argamassa de cal aérea e areia com base no traço volumétrico 1:2, com substituição de 5% de massa de cal aérea por terra argilosa
- CL2_10t(L) – argamassa de cal aérea e areia com base no traço volumétrico 1:2, com substituição de 10% de massa de cal aérea por terra argilosa
- CL2_25t(L) – argamassa de cal aérea e areia com base no traço volumétrico 1:2, com substituição de 25% de massa de cal aérea por terra argilosa
- CL2_50t(L) – argamassa de cal aérea e areia com base no traço volumétrico 1:2, com substituição de 50% de massa de cal aérea por terra argilosa

Ensaio e determinações

- CC – Coeficiente de Capilaridade
- DP – Desvio-padrão
- DS_D – Dureza superficial (Durómetro Shore A)
- DS_E – Resistência superficial (Esclerómetro pendular)
- Ed – Módulo de elasticidade dinâmico
- HR – Humidade Relativa
- IS – Índice de Secagem
- MV – Massa volúmica (estado fresco)
- MVa – Massa Volúmica aparente (estado endurecido)
- Pab – Porosidade aberta
- Rc – Resistência à compressão
- Rt – Resistência à tracção (por flexão)
- TS – Taxa de Secagem
- v – Velocidade de propagação dos ultra-sons
- VA – Valor Assimptótico (absorção capilar)

- W_t – Teor de água
- Δm – Variação de massa ao fim dos 25 ciclos de imersão/secagem, em solução com sulfatos
- λ – Condutibilidade térmica
- ρ – Massa volúmica (estado fresco)

1. INTRODUÇÃO

1.1. Motivação e enquadramento do tema

A crescente necessidade de reabilitar o edificado está associada a um termo que é, nos dias de hoje, muito falado: a sustentabilidade, não só em termos materiais, de tecnologias e sociais mas sobretudo em termos económicos. O aumento da população e o número elevado de novas construções levaram durante algumas décadas ao abandono de edifícios mais antigos. Quanto mais tempo passa sem se efetuar a manutenção ou reabilitação necessária de um edifício, mais difícil, demorada e dispendiosa será depois a intervenção necessária. Como tal, a conservação do existente e, quando necessário, encontrar os materiais adequados para a intervenção – compatíveis, económicos, duráveis e pouco consumidores de energia e de recursos naturais – é um passo de grande importância na sustentabilidade acima referida. Um material, um produto ou um elemento construtivo terá um menor impacto ambiental quanto maior for a sua vida útil, que depende de uma elevada durabilidade.

Um material que tem vindo a ser estudado como material de construção nos últimos anos é a terra que, apesar de utilizada em construções ancestrais, entrou em crescente desuso com a descoberta de novos materiais, associados a maior resistência e de rápida aplicação. A durabilidade deste tipo de construções conhece-se pela sua história, já que há inúmeras construções em terra que ainda hoje se mantêm habitáveis e/ou em bom estado de conservação. Apenas como exemplos têm-se os Castelos de Moura ou Alcácer do Sal, muitas casas no centro histórico de Évora (Fernandes, 2012) e por todo o Alentejo, o muro de taipa que contorna o Templo Horyuji no Japão, construído há aproximadamente 1300 anos (Hall & Djerbib, 2004), partes da muralha da China, casas tradicionais de taipa em França, que continuam habitáveis com mais de 100 anos (Bui *et al.*, 2009). Segundo Minke (2000), a terra é o material natural mais importante e que está disponível em todo o Mundo. É normalmente obtido diretamente do local de construção durante as escavações, reduzindo os custos a nível monetário, temporal e ambiental que advêm do transporte do material necessário. A remoção do solo para construção em terra é uma tarefa de baixos impactos em termos energéticos por poder ser realizada manualmente. As construções em terra têm a vantagem da possibilidade de desconstrução e nova utilização, que permite o aproveitamento de todo o material para novas obras, quando há necessidade de demolição. Isto desde que a terra não esteja estabilizada quimicamente.

A taipa e o adobe são dois exemplos comuns de tipos de construção de paredes com recurso à terra. A taipa consiste na colocação de terra humedecida em cofragens tradicionalmente de madeira (taipais), que vai sendo compactada em camadas sucessivas. As paredes de alvenaria de adobe são construídas através de blocos de adobe que são tradicionalmente produzidos em moldes de madeira mas que, neste caso, se deixam primeiro secar ao ar e só depois são assentes, normalmente com uma argamassa de terra semelhante à utilizada. Por vezes adicionam-se fibras ou cal aérea à terra para melhorar as suas propriedades (Torraca, 2009; Torres, 2005).

Os edifícios de terra podem ainda trazer vantagens em relação ao isolamento térmico e acústico. De acordo com um estudo de Goodhew e Griffiths (2005), a construção de novas paredes de terra satisfaz os requisitos de térmica do Reino Unido e a melhoria de paredes em terra já existentes (de modo a ir de encontro ao regulamento) pode ser conseguida. A espessura destas paredes também influencia o comportamento térmico porque resulta numa inércia elevada (Braga & Rocheta, 2007).

Olhando para trás, para as técnicas utilizadas com este material e para as bases da nossa arquitetura e construção, que serviram de aprendizagem para as gerações futuras, é possível ter uma visão também de futuro mas com recurso a materiais tão antigos e igualmente disponíveis que não podem ser descartados. As iniciativas existentes relativas a ações de recuperação de edifícios de terra começam a ter outra importância e existe atualmente uma abordagem totalmente diferente ao material terra, visto de novo como um material de qualidade que pode ser aproveitado localmente (Torres, 2005).

Esta dissertação realizou-se em paralelo com a dissertação da colega Inês Morgado Dias com o tema: *“Desenvolvimento e caracterização de argamassas de cal aérea e terra. A influência da terra como agregado parcial”*, através da qual se consegue a comparação de alguns resultados obtidos e está inserida nos projetos LIMECONTECH, financiado pela Fundação para a Ciência e a Tecnologia, Parede Eco-estrutural, financiado pelo QREN e PIRATE - ECVET Earthbuilding Europe - Provide Instructions and Resources for Assessment and Training in Earth Building, financiado pela Comissão Europeia. Esta publicação reflete apenas a visão do autor e a Comissão não pode ser responsabilizada por nenhum uso que possa ser feito com a informação respetiva.

1.2. Objetivos e metodologia

O objetivo desta dissertação é analisar as características e avaliar a aplicação de argamassas de cal aérea com incorporação de terra argilosa como ligante, particularmente como reboco de paredes de taipa, e dessa forma contribuir para um maior conhecimento deste tipo de argamassas. Para além de aferir a sua viabilidade neste tipo de aplicação e suporte pretende-se ainda avaliar a sua possibilidade de utilização como reboco de substituição ou reparação de paredes de edifícios antigos constituídos por alvenarias argamassadas ou de alvenarias com base em terra a necessitar de intervenções, como também para tratamento das juntas de assentamento de alvenarias de pedra à vista. Pretende-se ainda avaliar a sua aplicabilidade para utilização em novas construções de terra, principalmente como reboco de paredes de taipa.

Com vista aos objetivos definidos procede-se à avaliação deste tipo de argamassas através da comparação das suas características com uma argamassa considerada de referência, apenas de cal aérea. O traço volumétrico estudado foi de 1:2 (cal aérea e areia) e o objetivo final foi encontrar a quantidade de terra argilosa que vai de encontro à melhor aplicabilidade e trabalhabilidade da argamassa no estado fresco e também aos melhores comportamentos mecânicos, face à ação da água e ao ataque por sais no estado endurecido, quer em laboratório (com e sem influência do suporte), quer numa aplicação sobre um murete de taipa, sujeita às condições de exposição natural reais (chuva, vento e variações de temperatura).

A escolha de um traço tradicional mas relativamente forte de argamassas de cal aérea e areia siliciosa (1:2) deveu-se ao facto de, ao ser introduzida a argila em substituição parcial da cal aérea (como ligante), esta enfraquecer a argamassa em termos de ligante corrente - já que se trata de um material que, como não está calcinado, não deverá ter um elevado nível de reação com a cal aérea (Faria, 2012). Mesmo assim, conduzindo-se a características de desempenho correspondentes a um traço mais fraco em cal aérea, interessa conhecê-las de uma forma sistematizada. O presente estudo servirá também para verificar este aspeto.

1.3. Plano e estrutura do trabalho

A presente dissertação seguiu diversos passos até à sua conclusão.

Primeiramente realizou-se uma pesquisa bibliográfica à volta do tema proposto, por forma a decidir o rumo a tomar em relação às quantidades das misturas, às possíveis adições e aos ensaios a realizar. Em segundo lugar foi feito um planeamento sequencial dos ensaios e as durações dos mesmos, bem como as condições de ambiente controlado em que se iam proceder. De seguida iniciou-se a análise, discussão e comparação dos resultados obtidos. A aplicação num caso real (sujeito às intempéries) teve origem na curiosidade em comparar resultados laboratoriais com resultados reais. Por último, retiraram-se algumas conclusões e ideias para projetos futuros.

Para a apresentação do estudo realizado, este texto foi dividido em 10 capítulos que se descrevem de seguida. A bibliografia e os anexos constituem capítulos independentes.

O primeiro e presente capítulo (Introdução) inclui o enquadramento do tema, a descrição dos objetivos previstos e o plano de trabalho decorrido.

O segundo capítulo (Estado do conhecimento) abrange a bibliografia pesquisada dividida por tópicos relacionados com o tema, onde se insere a sustentabilidade na construção, o contexto histórico sobre utilizações de terra, as argamassas estudadas e que se pretendem desenvolver e as exigências funcionais requeridas para estas argamassas.

De seguida tem-se o terceiro capítulo (Planificação da campanha experimental) referente à organização dos ensaios desenvolvidos em cada fase.

O quarto capítulo (Materiais constituintes das argamassas) aborda os materiais utilizados para a execução das argamassas estudadas.

No capítulo cinco (Caracterização dos suportes e dos constituintes) são expostos os ensaios de caracterização dos suportes onde foram aplicadas as argamassas e a caracterização dos constituintes.

No capítulo seis (Preparação das argamassas, caracterização no estado fresco, provetes e cura) são expostos os ensaios de caracterização das argamassas no estado fresco. Este capítulo engloba também a preparação das argamassas e dos provetes e as condições de cura.

O capítulo sete apresenta os ensaios de caracterização das argamassas no estado endurecido, aplicadas nos suportes de tijolo, de taipa e nos provetes prismáticos.

O capítulo oito (Apresentação e análise dos resultados) compreende a apresentação e uma análise cuidada dos resultados obtidos ao longo da campanha experimental.

Em continuidade com o capítulo anterior, vem o nono capítulo (Discussão dos resultados) onde foi feita uma análise mais geral dos resultados obtidos, a comparação entre características e a comparação com outros estudos efetuados na área.

Por fim, o décimo capítulo (Conclusões) apresenta uma síntese do trabalho desenvolvido e algumas propostas de desenvolvimento futuro.

Em anexo apresentam-se as tabelas de resultados obtidos em cada ensaio, um anexo com os pontos positivos e negativos de cada ensaio realizado em comparação com a argamassa de referência e consoante a percentagem de terra adicionada a cada argamassa e, finalmente, o resumo publicado em ata, o respetivo poster do congresso CIHEL e o artigo submetido e aceite na conferência internacional CIAV2013.

2. ESTADO DO CONHECIMENTO

2.1. Sustentabilidade na construção

Cada vez mais, e aos poucos, é aplicável o termo sustentabilidade no sector da construção civil, através do cumprimento de determinados tópicos, entre eles: o uso de matérias-primas e produtos eco eficientes, menos consumidores de energia para a sua exploração, produção e transporte; o aproveitamento das condições naturais do local de construção; a redução dos consumos energético e de água para a construção e exploração; a reutilização e reciclagem correta dos resíduos de construção e demolição (RC&D) e, não menos importante, a consciencialização de todos os envolvidos na área sobre estes aspetos. Esta preocupação deve iniciar-se mesmo antes da existência de um edifício ou antes de se iniciarem os trabalhos propriamente ditos. Na fase de projeto é importante ponderar o processo de fabrico dos materiais (extração, transporte até às fábricas e até à obra) e os trabalhos de manutenção e reparação que serão necessários ao longo do tempo de vida útil do edifício (Braga & Rocheta, 2007).

O desenvolvimento sustentável é aquele que *“permite satisfazer as necessidades do presente sem comprometer as possibilidades das gerações futuras satisfazerem as suas”* de acordo com o *Relatório de Brundtland de 1987* (WCED, 1987). A União Europeia estabeleceu metas a cumprir a médio prazo: menos 50% de consumos energéticos, menos 30% das matérias-primas e menos 40% de resíduos. Com isto deve ter-se como ponto principal de estudo, os materiais de construção.

Em Portugal observou-se a construção de novos empreendimentos onde existiam construções que já não serviam para a finalidade para que foram construídas ou que já não se adequavam às necessidades dos utilizadores. No que toca a construções antigas, em certos casos, efetua-se a total demolição de um edifício, permanecendo apenas a fachada principal. A combinação entre a desconstrução e a reabilitação é um caminho para a sustentabilidade que deve ser seguido, mas com a devida metodologia de desmantelamento e aproveitamento. Considerando o panorama atual, em que a atividade do sector da construção é bastante reduzida, é indispensável que as empresas consigam dar resposta às exigências dos concursos, que incluem cada vez mais a componente ambiental. O aproveitamento dos materiais e a utilização de matérias-primas ecológicas e reutilizáveis conferem à desconstrução um papel de grande importância para a sustentabilidade na construção civil (Couto *et al.*, 2006).

2.2. Contexto histórico sobre a utilização de terra

A terra é um dos materiais de construção mais antigos que se conhece. Começou a ser utilizada como material de construção desde os primórdios da sociedade. A terra, enquanto material para a execução de argamassas foi usada ainda na pré-história no período Calcolítico (Idade do cobre) que surgiu entre o período Neolítico e a Idade do Bronze (Bruno *et al.*, 2010).

Apesar de existirem várias versões sobre a data da origem das construções de terra, todas se aproximam do intervalo 12000 a.C. e 7000 a.C. (Angulo–Ibanez *et al.*, 2012). Segundo Minke (2000), as construções em terra e as suas técnicas datam de há mais de nove mil anos. Há registos de casas feitas de adobe na Rússia entre 8000-6000 a.C. (Pumpelly, 1908 *in* Minke, 2000) e de taipa na Assíria em 5000 a.C.. O templo de Ramsés II no Egito foi construído com blocos de terra há 3200 anos, bem como várias mesquitas em Mali e no Irão. A Grande Muralha da China era inicialmente constituída por taipa e só posteriormente foi revestida com alvenaria de pedra. A amostra mais antiga de paredes de blocos de terra na Alemanha remonta ao ano 600 a.C. e foi descoberta no forte Heuneburg. Em Espanha também é conhecida a existência de fortes de finais do ano 100 a.C. No México, América Central e América do Sul a utilização da alvenaria de adobe é comum na maioria das culturas pré-colombianas. Entre os séculos XIII e XVII d.C. a terra foi usada em toda a Europa Central. Em França a taipa teve uma imensa utilização entre os séculos XV e XIX d.C. e alguns dos edifícios ainda existem hoje em dia. A casa (desabitada) mais antiga da Alemanha feita de taipa data de 1795 e pertenceu ao diretor dos bombeiros que garantia que a resistência ao fogo neste tipo de construções se tornava mais económica do que as tradicionais casas de madeira com preenchimento de terra. Depois da Primeira e da Segunda Guerra Mundial, centenas de casas foram construídas na Alemanha com recurso a terra, por escassez de materiais de construção.

Segundo Varum *et al.* (2005), em Portugal, a construção em terra foi bastante utilizada no século XIX e é predominante no sul e no centro litoral de país (Torres, 2005). No sul a técnica utilizada é maioritariamente a taipa, enquanto que no centro litoral são os blocos de adobe que mais se aplicam. O crescimento da indústria cerâmica e do cimento levou ao desuso do material terra e das suas técnicas de aplicação. Em Espanha parou de se construir com terra a partir de metade do século XIX (Delgado & Guerrero, 2006); em Portugal a redução da sua utilização notou-se a meio do século XX (Varum *et al.*, 2005).

O final do século XX e o século XXI deram início a uma nova fase de construções de terra dadas as suas propriedades sustentáveis e de baixo impacto ambiental. O número de projetos de investigação entre universidades, instituições e eventos nesta área é cada vez maior. Estes estudos investigam diferentes construções em terra através da recolha de amostras de modo a expandir o conhecimento das técnicas ancestrais e a modernização das mesmas, à procura da melhor relação entre os materiais e as técnicas utilizadas, com a finalidade de obter melhores características na sua aplicação (Bestraten *et al.*, 2011). A utilização da terra em construção nova deve-se às qualidades arquitetónicas, às boas características térmicas e acústicas, ao eventual custo baixo de fabrico e à facilidade de reciclagem (Gomes *et al.*, 2009). Durante muitos anos foram utilizadas em intervenções, argamassas com base em cimento, como a melhor alternativa à reparação de rebocos de paredes de terra o que introduzia deficiências no comportamento entre o suporte e o reboco (Castilha, 2011; Gomes *et al.*, 2011). A aprendizagem das boas práticas de intervenção de edifícios de terra é feita através da experiência e análise das intervenções feitas anteriormente e que não obtiveram bons resultados com o passar do tempo (Fernandes, 2012). A aplicação de tintas nos revestimentos, tanto interiores como

exteriores, por ser dispensada já que a coloração conferida por argamassas com terra é por si só suficiente, se a tonalidade for a desejada. No entanto, se aplicada, pode constituir mais uma camada de proteção.

2.3. Matérias-primas

2.3.1. Terra e argamassas

Terra ou solo são “camadas perceptíveis na superfície da terra, compostas por matérias orgânicas e minerais, sendo as suas principais componentes a argila, os calcários, o húmus e as areias. O estudo dos solos como suporte para construções é uma ciência a reclamar permanentes trabalhos de investigação” (Branco, 1993).

Segundo Torraca (2009), a terra usada na construção deve ser rica em argila de modo a ser plástica no estado fresco e sólida quando seca. No entanto a sua quantidade também não deve ser em excesso para evitar a retração e deve depender do tipo de produto e de aplicação. De acordo com o mesmo autor, a terra adequada para construção deve ser composta por 20-30% de argila e silte e 70-80% de areia. Ciano e Jaquin (2011) mostram intervalos de valores recomendados por *Walker et al. (2005)*, *Rammed earth, design and construction guidelines*, para terra usada na construção de edifícios de taipa, nomeadamente percentagens de areia, siltes, argila, limites de liquidez e índice de plasticidade. Gomes *et al.* (2012c) avaliou essas gamas para casos de estudo portugueses e verificou que muitas construções em taipa existentes há décadas eram constituídas por terra com composições muito distintas, o que mostra a sua versatilidade face à utilização nesta técnica. Para aplicação em argamassas também deviam ser definidas gamas, mas para este fim, qualquer terra (preferencialmente pouco expansiva) pode ser corrigida ou estabilizada pela adição de areia, ligante ou fibras.

As argamassas de terra utilizaram-se em abundância há milhares de anos, por terem na sua constituição um material disponível em qualquer local do Mundo. Começaram a ser esquecidas ao longo do tempo e, devido a este facto, são poucas as pessoas que ainda conhecem as suas técnicas de formulação e aplicação. Estas argamassas de terra (argilosa) são conhecidas pela rápida absorção de água devido à sua constituição. Num estudo realizado por Gomes *et al.* (2012a) com o intuito de avaliar o teor de água em relação à trabalhabilidade de argamassas de terra, através da execução de ensaios no estado fresco e no estado endurecido, verificou-se que a retração e a trabalhabilidade se relacionam com a relação água/material seco e que quanto mais elevada for esta relação, maior a retração volumétrica. Uma das terras analisadas nesse estudo trata-se da terra utilizada na presente dissertação. Os problemas que surgem com este tipo de argamassas prendem-se com o controlo da retração devido à quantidade de argila versus a capacidade de aderência ao suporte e entre camadas (Faria, 2012).

Têm sido estudadas as características de amostras retiradas de construções antigas com base em terra; no entanto, tratam-se de características de materiais que já sofreram agressões físicas e químicas ao longo do tempo, pelo que por vezes não retratam fielmente as propriedades que se obteriam com a aplicação em construções novas ou em reabilitação, nem a caracterização inicial dos materiais utilizados nestas construções (Gomes *et al.*, 2012c; Varum *et al.*, 2005; Mateus, 2006).

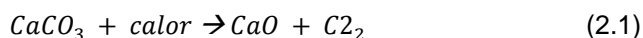
Estudos realizados mostram que a adição de pequenas quantidades de fibras, tanto naturais como artificiais, melhoram a retração inicial de argamassas com base em terra. A resistência à tração diminui com o aumento da percentagem de fibras, enquanto a resistência à compressão aumenta. No caso de elevadas quantidades de fibras não há melhorias no comportamento e pode, em certos casos, ser prejudicial. O tamanho e a forma das fibras são fatores importantes a ter em conta (Aymerich *et al.*, 2012; Binici *et al.*, 2005; Ghavami *et al.*, 1999; Yetgin *et al.*, 2008). Há também melhorias na resistência ao corte e um aumento da coesão (Prabakar & Sridhar, 2002).

No que toca à adição de pozolanas, vários autores estudaram as características físicas e mecânicas destas argamassas com base em terra, obtendo bons resultados de resistência à compressão e à tração, módulo de elasticidade, diminuição do índice de vazios, e de durabilidade relativamente à absorção de água e à retração (Hossain & Mol, 2011; Prabakar *et al.*, 2004).

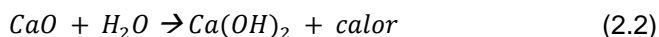
2.3.2. Cal aérea e argamassas

Segundo a norma NP EN 459-1 (IPQ, 2011) as cals aéreas classificam-se em cálcicas (CL) ou dolomíticas (DL) cujas designações dependem de alguns aspetos tais como o teor em hidróxido de cálcio livre, os sulfatos e as adições permitidas. São constituídas por óxido de cálcio ou hidróxido de cálcio (CaO ou Ca(OH)_2). As cals aéreas cálcicas apresentam cor branca; no entanto as dolomíticas são mais escuras. Possuem a propriedade de não endurecer na presença de água, pois necessitam de reagir com o dióxido de carbono da atmosfera.

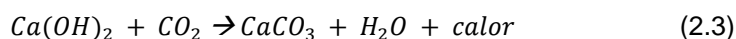
A obtenção de cal aérea cálcica resulta primeiramente da cozedura de calcários puros, ou seja, com teores de impurezas iguais ou inferiores a 5% (carbonato de cálcio para as cals aéreas cálcicas, CaCO_3) a cerca de 900°C – mais precisamente 894°C – denominada reação de calcinação (expressão 2.1). Esta reação origina óxido de cálcio (cal viva) e dióxido de carbono (Coutinho, 2006; Faria, 2004; Torraca, 2009).



A cal viva é muito instável e como tal é necessária a sua hidratação (ou extinção). Esta reação de hidratação (expressão 2.2) transforma a cal viva em cal apagada (extinta ou hidratada), que resulta em hidróxido de cálcio. Pode ser feita por aspersão ou por imersão com água (Coutinho, 2006; Faria, 2004; Torraca, 2009).



A carbonatação (expressão 2.3) é a reação que se segue à hidratação da cal viva. Esta reação proporciona o endurecimento da cal através da libertação de água quando em contacto com o dióxido de carbono presente na atmosfera. Transforma a cal hidratada (hidróxido de cálcio ou portlandite) novamente em carbonato de cálcio (Coutinho, 2006; Faria, 2004; Torraca, 2009).



Apesar do produto resultante ser constituído pelo mesmo produto inicial (rocha calcária), as propriedades são bastante diferentes devido à reorganização mineralógica dos seus cristais. Advém então que, quando em constante contacto com a água, pode ocorrer uma lavagem do ligante através da formação de bicarbonato de sódio, que é solúvel em água (Faria, 2004).

A cal aérea é um dos materiais mais antigos utilizados na construção, antecedido pela terra, barro, pedra e madeira (Margalha, 2011). As argamassas de cal aérea foram utilizadas nos edifícios até à segunda metade do século XIX, quando começaram a ser substituídas pelos ligantes hidráulicos (mais propriamente o cimento). A utilização de cal aérea como único ligante numa argamassa exige o conhecimento e domínio dos processos de endurecimento e das técnicas de aplicação, que durante vários séculos foram transmitidos de geração em geração (Margalha, 2011). A introdução de ligantes hidráulicos levou à redução da sua utilização em obra e, como tal, à perda do conhecimento das técnicas de aplicação e características deste tipo de argamassas. (Veiga *et al.*, 2010; Faria, 2004).

O uso de cal aérea como ligante resulta em alguns problemas conhecidos tais como: o endurecimento lento, baixos tempos de carbonatação, elevada retração inicial, baixas resistências mecânicas e proteção face à água e aos agentes biológicos. Estas questões culminaram na sua substituição pelo cimento, de que resultam argamassas com maiores resistências mecânicas e endurecimento rápido (Arizzi & Cultrone, 2012; Faria *et al.*, 2010). Contudo, os efeitos negativos deste material no património cultural (muito rígido, impermeável à água e ao vapor de água, com tendência para abrir fendas e para que ocorram infiltrações de água por essas fendas que muito dificilmente consegue depois sair, o que causa a rápida degradação dos materiais (Veiga *et al.*, 2010)) têm levado ao estudo da reintrodução de argamassas de cal com a utilização de adições, a título de exemplo pozolanas tais como “*metacaulinos, sepiolite, zeólitos, resíduos de cerâmica, cinza de casca de arroz, cinza de cana-de-açúcar*” (Faria, 2012). A utilização das pozolanas tem em vista melhorar as características das argamassas de cal aérea, nomeadamente acelerando o endurecimento e obtenção de características mecânicas, mesmo em condições ambientes adversas de elevada humidade e fraco contacto com o CO₂, e assim facilitar a sua reutilização.

2.4. Argamassas de cal aérea e terra

A execução de argamassas mistas de cal aérea e terra argilosa pode constituir uma solução alternativa às argamassas de cal aérea aditivadas e vai de encontro às preocupações com a sustentabilidade e à necessidade de melhorar as características referidas anteriormente.

Faria (2012) sugere que hoje em dia se procura a utilização de argamassas mistas de terra e cal aérea, como ligante mais compatível para aplicar na reparação de paredes constituídas por estes materiais, uma vez que muitas vezes eram também deste tipo as originalmente aplicadas. A mesma autora fala na necessidade de caracterização e “otimização de argamassas mistas de cal e terra”. Existe já alguma investigação no estudo de argamassas de reparação de paredes de taipa através do estudo de argamassas de terra com incorporação de cal aérea e fibras (Gomes *et al.*, 2012a, 2012b, 2012c). Outra vertente estudada aborda a estabilização de terra com cals aéreas (cálcicas e dolomíti-

cas). Neste estudo foram extraídas e caracterizadas terras diferentes, em termos de localização e composição argilosa, e foram realizadas argamassas onde se cobriu totalmente a cal com terra e depois se adicionou água até a cal se encontrar extinta. (Fernandes *et al.*, 2012).

Segundo Delgado e Guerrero (2006), os revestimentos com base em cimento, aplicados na reabilitação de edifícios de terra não se mostraram eficazes devido a aspetos como a baixa flexibilidade e acompanhamento dos movimentos naturais das paredes e a baixa porosidade, ponderando a utilização de rebocos de terra e cal, por forma a permitir a compatibilidade dos materiais. Sempre que possível, os materiais para a elaboração das argamassas à base de terra devem ser obtidos no mesmo local dos materiais utilizados inicialmente na construção (Gomes & Faria, 2011).

Segundo Torraca (2009), a cal é utilizada em construções modernas de terra como estabilizante desta numa quantidade superior a 20%, melhorando as características mecânicas e a resistência à água.

A utilização de diferentes agregados numa argamassa de cal aérea pode alterar as propriedades desta, dependendo da quantidade de argila presente (Henriques & Faria, 2008). Este facto pode ser relacionado com a introdução de terra (argilosa) e consequente alteração do comportamento.

Os estudos desenvolvidos abrangem maioritariamente os seguintes tópicos: argamassas ou solos argilosos com pozolanas e/ou fibras de diferentes tipos (naturais ou artificiais), argamassas de cal aérea com pozolanas e/ou fibras. Não há portanto muita informação concreta sobre as características de argamassas de cal aérea com introdução de terra e as melhorias que esta pode trazer para o sector da construção. A reduzida bibliografia encontrada referente a este tipo específico de argamassas mostra a necessidade de realização de trabalhos nesta área.

O aproveitamento das vantagens das argamassas de cal aérea e das argamassas de terra, tais como a compatibilidade com suportes antigos, as resistências mecânicas das argamassas de cal aérea, o comportamento das argamassas de terra face à água e o comportamento face ao vapor de água, são alguns dos aspetos que podem ser conseguidos e otimizados com a junção dos dois materiais.

2.5. Exigências funcionais das argamassas

As argamassas têm diversas aplicações tais como: revestimentos exteriores e interiores, consolidação, fechamento de juntas, assentamento de blocos, etc., e consoante a função apresentam requisitos e exigências diferentes (Henriques & Faria, 2008). Uma grande parte das construções em Portugal é antiga (constituída maioritariamente por argamassas de cal) e por isso, o estudo de argamassas de substituição compatíveis é urgente e crescente. Apesar das estratégias de conservação constituírem uma alternativa à construção nova, através de pequenas reparações ao nível das juntas, fendas, coesão e adesão, por vezes é necessário substituir grande parte dos revestimentos antigos. Torna-se assim necessário o desenvolvimento de novas argamassas mais duráveis e compatíveis com os materiais existentes (Veiga *et al.* 2008b; Veiga *et al.*, 2009; Veiga *et al.*, 2010).

As exigências funcionais de uma argamassa diferem de região para região, de acordo com o clima e as diferentes técnicas de construção. Por isso não é possível estabelecer proporções específicas para as argamassas de reboco interior e exterior que funcionem eficazmente em toda a Europa.

Deve então seguir-se a norma aplicável, mas também ter como base a prática e a experiência de construção em cada local (CEN, 2010).

As exigências funcionais e as características das argamassas em edifícios antigos diferem consoante a principal função que vão desempenhar, que por sua vez depende da sua aplicação (Henriques & Faria, 2006):

- Reboco exterior – proteção contra a ação da chuva (forma líquida ou vapor) através da baixa absorção de água e elevada permeabilidade ao vapor de água;
- Reboco interior – proteção contra ações mecânicas conferindo uma boa dureza superficial;
- Refechamento de juntas – proteção contra a água/ estabilidade estrutural através da baixa absorção de água, elevada permeabilidade à água e expansibilidade;
- Injeções (caso de caldas e não propriamente argamassas) – estabilidade estrutural, com a facilidade de injeção.

As regras de qualidade exigidas para um qualquer revestimento exterior são imprescindíveis para um bom comportamento: trabalhabilidade, resistência à fendilhagem, capacidade de impermeabilização em zona não fendilhada, permeabilidade ao vapor de água, aderência ao suporte, resistência aos choques, compatibilidade com o suporte, aspeto estético e durabilidade. Para os revestimentos interiores estes parâmetros são igualmente importantes, excetuando a capacidade de impermeabilização em zona não fendilhada (Veiga, 1998).

Quando se trata de edifícios antigos, as características dos rebocos exteriores necessárias para a proteção das alvenarias existentes são (Henriques & Faria, 2006):

- menor absorção capilar possível ou seja, menor coeficiente de capilaridade e menor valor assintótico;
- permeabilidade ao vapor de água suficiente, mas não excessiva;
- estabilidade dimensional;
- mais fracos que a alvenaria, mais deformáveis (através do módulo de elasticidade dinâmico, E_d), propriedades mecânicas a decrescer do interior para o exterior;
- boa aderência ao suporte e entre camadas;
- libertação mínima de sais solúveis.

Em relação à durabilidade:

- resistência elevada aos sais;
- resistência ao ciclo gelo/degelo;
- boas resistências mecânicas, ligadas à estrutura porosa;
- presa num tempo suficientemente curto.

Torna-se assim importante a realização de vários ensaios às argamassas por forma a caracterizá-las e poder optimizá-las de modo a obter argamassas que possam cumprir as exigências desejadas (Henriques & Faria, 2006):

- resistências à compressão e à flexão;
- tempo de presa;
- aderência;
- módulo de elasticidade (estático ou dinâmico);

A influência da terra como ligante

- absorção de água por capilaridade (coeficiente de capilaridade e valor assintótico);
- permeabilidade ao vapor de água (índice de secagem);
- resistência aos cloretos e/ou aos sulfatos;
- resistência a ciclos gelo/degelo;
- libertação de sais (análises químicas ou por condutividade);
- retração e variações dimensionais (ação da temperatura e da humidade).

Os materiais a utilizar nos revestimentos de substituição prendem-se com os critérios de compatibilidade, funcionais, de aspeto e comportamento futuro, conjuntamente com os materiais já existentes. Quando se trata de edifícios antigos a substituição total ou parcial do reboco deve ter em conta os seguintes requisitos (Veiga, 2003):

- não contribuir para a degradação dos elementos pré-existentes;
- proteger as paredes;
- não alterar o aspeto visual do edifício;
- ser durável.

O Quadro 2.1 agrupa algumas gamas de requisitos propostas para argamassas com 90 dias para edifícios antigos.

Quadro 2.1 – Exigências funcionais de um reboco para edifícios antigos (Veiga *et al.*, 2010)

Tipo de reboco	Características mecânicas aos 90 dias			Comportamento à água
	Rt [Mpa]	Rc [Mpa]	Ed [Mpa]	CC [kg/(m ² .min ^{1/2})]
Reboco exterior	0,2 – 0,7	0,4 – 2,5	2000 – 5000	1,0 < CC < 1,5
Reboco interior	0,2 – 0,7	0,4 – 2,5	2000 – 5000	-
Refechamento de juntas	0,4 – 0,8	0,6 – 3,0	3000 - 6000	1,0 < CC < 1,5

Rt – Resistência à tração; Rc – Resistência à compressão; Ed – Módulo de elasticidade; CC – coeficiente de capilaridade.

Outros requisitos a respeitar referem-se à aderência, ao comportamento à retração restringida, aos ensaios com o humidímetro e ao envelhecimento artificial acelerado.

A norma EN 998-1 (CEN, 2010) refere algumas gamas de valores, para argamassas correntes e algumas para aplicações específicas (Quadro 2.2)

Quadro 2.2 – Propriedades de rebocos para revestimentos, norma EN 998-1 (CEN, 2010)

Propriedades	Categorias	Valores
Gama de resistência à compressão aos 28 dias	CS I	0,4 N/mm ² a 2,5 N/mm ²
	CS II	1,5 N/mm ² a 5,0 N/mm ²
	CS III	3,5 N/mm ² a 7,5 N/mm ²
	CS IV	≥ 6 N/mm ²
Absorção de água por capilaridade	W 0	Não especificado
	W 1	CC ≤ 0,40 kg/m ² .min ^{0,5}
	W 2	CC ≤ 0,20 kg/m ² .min ^{0,5}

Para a obtenção de todos os parâmetros referidos anteriormente é de grande importância conhecer as características da argamassa no estado fresco. As condições de aplicabilidade e trabalhabilidade influenciam o trabalho que se obtém. Conseguir as quantidades adequadas de constituintes e de água a adicionar, bem como o tempo e a forma da mistura, é um dos primeiros passos a ter em conta para que os resultados no estado endurecido sejam os esperados (Veiga, 1998).

3. PLANIFICAÇÃO DA CAMPANHA EXPERIMENTAL

3.1. Introdução

Com a presente dissertação pretende-se dar um contributo ao conhecimento do comportamento de argamassas mistas de cal aérea e terra, necessário para a avaliação das vantagens da sua utilização. Para tal procedeu-se ao estudo de argamassas de cal aérea e areia com substituições sucessivas do ligante (cal aérea) por terra. Pretendeu-se caracterizar e comparar 4 argamassas mistas de cal aérea e terra argilosa, de traço volumétrico base de 1:2, com percentagens mássicas de terra argilosa como substituição da cal aérea (5%, 10%, 25%, 50%). A comparação decorreu entre as argamassas mistas e com uma argamassa padrão, composta apenas por cal aérea e areia e com o traço volumétrico 1:2. Para tal, foram efetuados ensaios de caracterização das argamassas no estado fresco a todas as argamassas. Estas foram caracterizadas no estado endurecido, neste caso através de provetes prismáticos, realizados em moldes metálicos impermeáveis, e através de provetes em que as argamassas foram aplicadas sobre um suporte de tijolo. Duas das argamassas (a de referência e uma mista considerada como uma das mais eficientes, com base nos resultados no estado fresco) foram também aplicadas no reboco de um murete de taipa e caracterizadas.

A campanha experimental foi devidamente planeada por forma a serem realizados os ensaios e as atividades previstos e pela ordem definida, cumprindo os tempos de cura e a duração da campanha. As decisões tomadas inicialmente sofreram algumas modificações consoante a obtenção dos resultados que permitiam escolher o caminho a seguir. Os ensaios foram realizados nos Laboratórios de Construção do Departamento de Engenharia Civil da FCT-UNL.

Todos os ensaios foram realizados em paralelo com os ensaios da colega Inês Dias, cuja ajuda (mútua) foi indispensável. A campanha teve a ajuda e acompanhamento do Engenheiro Vítor Silva, que se mostrou sempre disponível para ajudar e esclarecer todas as dúvidas existentes, contribuindo assim para uma mais rigorosa realização dos ensaios e também para a constante aprendizagem. Os conselhos de outros colegas em relação aos ensaios e resultados obtidos foi também muito importante para a minimização dos erros experimentais.

A parte experimental da dissertação está dividida em quatro partes que se descrevem seguidamente.

3.2. Caracterização dos suportes

Numa primeira fase caracterizaram-se os suportes onde se aplicaram as argamassas em estudo: murete de taipa e tijolo de 7cm.

À data da campanha experimental relativa ao murete, este encontrava-se construído há 6 meses. A superfície ensaiada estava virada a Nascente e, à data de algumas das determinações, as condições de humidade da parede eram bastante elevadas. Tal deveu-se ao facto de ter chovido com

A influência da terra como ligante

muita intensidade nos dias que antecederam a caracterização do murete e este estar diretamente fundado no terreno, sem fundação independente nem corte hídrico. O murete possui um capeamento a telha na parte superior. Os ensaios efetuados apresentam-se no Quadro 3.1.

Quadro 3.1 – Ensaios de caracterização dos suportes

Ensaios	Tipo de material	Norma de base
Resistência superficial por esclerómetro pendular	Murete de taipa	ASTM C805 (ASTM, 2008)
Condutibilidade térmica	Murete de taipa Tijolo cerâmico	Manual do Equipamento
Absorção de água sob baixa pressão – tubos de Karsten	Murete de taipa Tijolo cerâmico	Fe Pa 39 (LNEC, 2002) e Test No. II.4 (RILEM, 1980)

3.3. Caracterização dos constituintes

Nesta segunda fase pretendeu-se caracterizar os materiais utilizados, nomeadamente conhecer algumas características da terra argilosa utilizada e que também foi utilizada em estudos realizados por Gomes *et al.* (2012a, 2012b, 2012c, 2012d) em argamassas de terra para reparação de paredes de taipa. Esta terra, disponibilizada pela empresa Sorgila, foi fornecida para utilização na presente dissertação já seca e destorroada, tendo sido para esse efeito previamente sujeita a moagem em moinho de maxilas, para desagregar os torrões inicialmente presentes e posteriormente homogeneizada com um repartidor (Gomes *et al.*, 2012d). Os ensaios aos constituintes apresentam-se no Quadro 3.2.

Quadro 3.2 – Ensaios aos constituintes

Ensaios	Tipo de material	Norma de base
Baridade	Terra argilosa desterroada	NP EN 1097-3 (IPQ, 2000)
Análise Granulométrica por via seca	Terra argilosa desterroada	NP EN 933-1 (IPQ, 2000)

3.4. Caracterização das argamassas no estado fresco

A caracterização das argamassas no estado fresco foi dividida em duas partes, uma vez que nesta se procedeu à formulação e realização das argamassas e estas foram realizadas em duas etapas. Com efeito, produziram-se as cinco argamassas tendo-se para cada uma delas, realizado 4 amassaduras. As amassaduras 1 e 2 decorreram numa etapa, realizadas com cal aérea de um mesmo saco

(que, embora se encontrasse previamente aberto, estava envolto em filme de polietileno e convenientemente acondicionado) e as amassaduras 3 e 4 decorreram na etapa seguinte, com cal aérea mas de outro saco, embora fornecido pelo produtor na mesma data e proveniente do mesmo lote (e que até à data estava fechado mas também envolto em filme de polietileno). Procedeu-se à determinação da consistência por espalhamento em cada uma das quatro amassaduras (2 ensaios em cada uma das etapas de amassaduras para cada argamassa), tendo-se para as restantes caracterizações no estado fresco procedido apenas a um ensaio em cada etapa, para cada argamassa. De seguida produziram-se os provetes prismáticos nos moldes metálicos e os provetes de argamassa no revestimento de um tijolo furado corrente de 7 cm de espessura. Estas atividades foram realizadas na 1ª etapa de amassaduras e novamente efetuadas na 2ª etapa, de repetição, com duas semanas de intervalo entre elas. Os ensaios efetuados apresentam-se no Quadro 3.3.

Quadro 3.3 – Ensaio no estado fresco

Ensaio	Tipo de material	Norma de base
Consistência por espalhamento	Argamassa no estado fresco	EN 1015-3 (CEN, 1999)
Massa volúmica	Argamassa no estado fresco	EN 1015-6 (CEN, 1998a)
Teor de ar	Argamassa no estado fresco	EN 1015-7 (CEN, 1998b)
Retenção de água	Argamassa no estado fresco	prEN 1015-8 (CEN, 1999b)
Avaliação da aplicabilidade	Argamassa no estado fresco	-
Avaliação da retração de secagem inicial	Argamassa no estado fresco e início do endurecimento	-

3.5. Caracterização das argamassas no estado endurecido

Para a caracterização das argamassas no estado endurecido os provetes de argamassa sobre tijolos foram ensaiados aos 28 dias através de ensaios não destrutivos e posteriormente aos 90 dias. Estava prevista a realização de ensaios de arrancamento com equipamento a adquirir mas a verba alocada a projeto não foi desbloqueada e a compra não foi realizada em tempo útil, o que inviabilizou os ensaios correspondentes. Os provetes prismáticos foram ensaiados aos 90 dias. O reboco de argamassa aplicada no murete foi ensaiado aos 90 dias. Devido às diferentes condições de humidade do murete, e à sua influência nas características determinadas, este facto vai ser referido ao longo da apresentação dos resultados. Devido ao facto de se identificar muito distintamente uma diferenciação ao nível da humidade na altura do murete (50 cm junto à base do murete sempre húmido e com cor mais escura), que pode influenciar distintamente as características das argamassas, estas são caracterizadas através de determinações abaixo e acima deste nível. Os ensaios efetuados apresentam-se nos Quadros 3.4, 3.5 e 3.6.

Quadro 3.4 – Ensaio no estado endurecido (suporte de tijolo – 28 e 90 dias de cura)

Ensaio	Tipo de material	Norma de base
Dureza superficial (durómetro Shore A)	Argamassa aplicada sobre o tijolo	ASTM D2240 (ASTM, 2000)
Condutibilidade térmica	Argamassa aplicada sobre o tijolo	Manual do equipamento
Velocidade de propagação dos ultrassons	Argamassa aplicada sobre o tijolo	Fe Pa 43 (LNEC 2010)
Absorção de água sob baixa pressão – tubos de Karsten	Argamassa aplicada sobre o tijolo	Fe Pa 39 (LNEC, 2002) e Test No. II.4 (RILEM, 1980)
Porosimetria e porosidade aberta de mercúrio (só aos 90 dias)	Amostra de argamassa retirada do contacto com o tijolo	Manual do equipamento

Quadro 3.5 – Ensaio no estado endurecido (prismas – 90 dias de cura)

Ensaio	Tipo de material	Norma de base
Massa volúmica (7, 28 e 90 dias)	Prisma de argamassa	-
Condutibilidade térmica	Prisma de argamassa	Manual do equipamento
Módulo de elasticidade dinâmico	Prisma de argamassa	NP EN 14146 (IPQ, 2007)
Resistência à tração por flexão e à compressão	Prisma de argamassa	EN 1015-11, (CEN, 1999a)
Porosidade aberta e Massa volúmica aparente pelo método hidrostático	Parte de prisma de argamassa	NP EN 1936, (IPQ, 2008)
Porosimetria e porosidade aberta de mercúrio	Parte de prisma de argamassa	Manual do equipamento
Capilaridade	Metade de prisma de argamassa	EN 1015-18 (CEN, 2002) e EN 15801 (CEN, 2009)
Secagem	Metade de prisma de argamassa	Test No. II.5 (RILEM, 1980a) e Test No. II.4 (RILEM, 1980)
Resistência aos sulfatos	Metade de prisma de argamassa	NP EN 12370 [IPQ, 2001]

Quadro 3.6 – Ensaaios ao reboco aplicado no murete (90 dias de cura)

Ensaaios	Tipo de material	Norma de base
Dureza superficial (durómetro shore A)	Reboco aplicado no murete	ASTM D2240 (ASTM, 2000)
Resistência superficial por esclerómetro pendular	Reboco aplicado no murete	ASTM C805 (ASTM, 2008)
Velocidade de propagação dos ultras- sons	Reboco aplicado no murete	Fe Pa 43 (LNEC 2010)
Absorção de água sob baixa pressão – tubos de Karsten	Reboco aplicado no murete	Fe Pa 39 (LNEC, 2002) e Test No. II.4 (RILEM, 1980)
Porosimetria e porosidade aberta de mercúrio	Amostra de reboco retirada do contacto com o murete	Manual do Equipamento

4. MATERIAIS CONSTITUINTES DAS ARGAMASSAS

Uma argamassa é normalmente constituída por água, areia e ligante, podendo conter adições ou adjuvantes. Neste trabalho, e como já anteriormente referido, estuda-se a introdução de terra argilosa como substituto parcial de cal aérea, utilizada como ligante.

4.1. Água a areia

A água adicionada na confeção das argamassas é proveniente da rede pública. A quantidade de água a adicionar foi considerada tendo em conta os resultados obtidos no ensaio de espalhamento para uma boa aplicabilidade.

Na produção das argamassas usaram-se três tipos de areias siliciosas, lavadas e graduadas, adquiridas num fornecedor (APAS12, APAS20 e APAS30), sendo a APAS12 a de granulometria mais grossa, a APAS 20 a de granulometria intermédia e a APAS 30 a de granulometria mais fina (Figura 4.1). As baridades foram determinadas em estudos anteriores (Carneiro, 2012) e encontram-se no Quadro 4.1. Têm sido utilizadas no âmbito dos projetos financiados pela Fundação para a Ciência e a Tecnologia METACAL e LIMECONTECH. As quantidades foram constantes para as diferentes argamassas, nas proporções volumétricas de 1:1,5:1,5 respetivamente de APAS12:APAS20:APAS30.



Figura 4.1 – Areias APAS12, APAS20 e APAS30

Quadro 4.1 – Baridades das areias (Carneiro, 2012)

Material	Baridade [kg/dm ³]
APAS12	1,412
APAS20	1,405
APAS30	1,388
Mistura das areias	1,463

As curvas granulométricas das diferentes areias e da mistura foram efetuadas com base na norma NP EN 933-1 (IPQ, 2000a) (Figura 4.2)

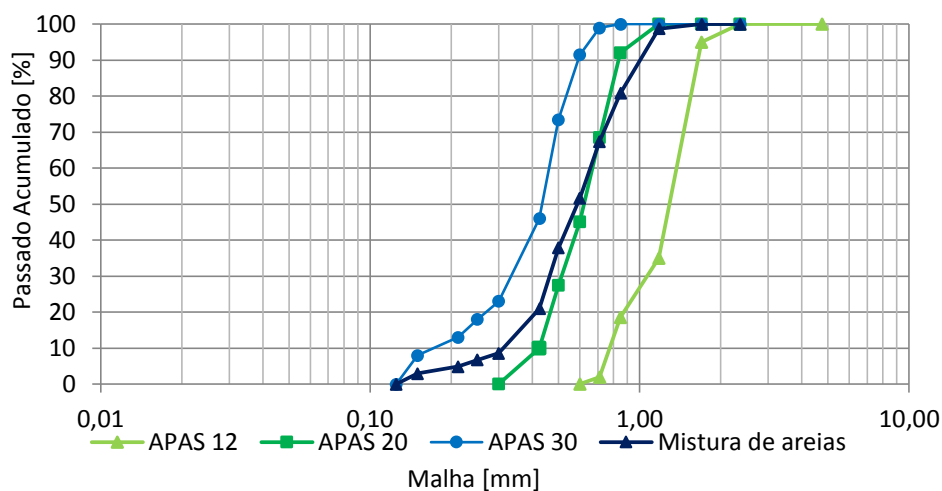


Figura 4.2 – Curva granulométrica das areias e da mistura de areias

4.2. Terra argilosa

A terra utilizada é um solo já estudado em trabalhos anteriores (Figura 4.3) (Gomes *et al.*, 2012a, 2012b, 2012c, 2012d), originária da zona de Rendinha, Pombal, e disponibilizada pela empresa SORGILA. Contém uma elevada percentagem de finos (Quadro 4.2) e não contém argilas consideradas muito expansivas. Apesar de já existir uma análise granulométrica por via húmida (Figura 4.4), procedeu-se também à análise granulométrica a seco e à determinação da baridade.



Figura 4.3 – Terra

Quadro 4.2 - Composição mineralógica das amostras da terra obtidas por DRX (Gomes *et al.*, 2012d)

Compostos cristalinos identificados	Terra
Quartzo	+++
Feldspatos	Vtg
Mica	Vtg
Clorite	?
Caulinite	++
Geotite	+
Anatase	+/Vtg
Notação: +++ proporção elevada; ++ proporção média; + proporção fraca; Vtg vestígios; ? dúvidas na presença; - não identificado	

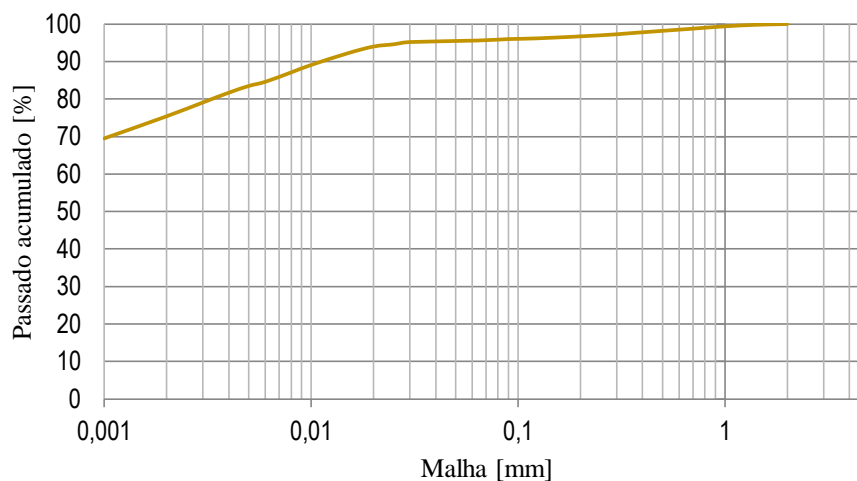


Figura 4.4 – Análise granulométrica das amostras de terra por via húmida (Gomes *et al.*, 2012d)

4.3. Cal aérea

A cal aérea hidratada em pó utilizada nas argamassas é da marca LUSICAL e foi disponibilizada pelo produtor. Trata-se de uma cal cálcica (CL90), de acordo com a norma NP EN 459-1 (IPQ, 2011), é comercializada com a designação de H100 e será referida como CL ao longo deste trabalho (Figura 4.5). A baridade e a composição química da cal aérea apresentam-se respetivamente nos Quadros 4.3 e 4.4.

Quadro 4.3 – Baridade da cal aérea

Material	Baridade (kg/dm ³)
CL	0,362

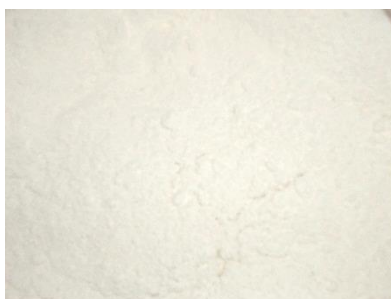


Figura 4.5 – Cal aérea (CL) da Lusical

Quadro 4.4 - Composição química da cal aérea (em % de massa) (Gameiro *et al.*, 2012)

Material	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	MnO	MgO	CaO	Na ₂ O	K ₂ O	TiO ₂	P ₂ O ₆	L.O.I.*
Cal Aérea	-	0.01	0.15	0.01	3.09	76.74	-	0.02	0.04	0.01	0.45

*Loss on ignition (perda ao fogo)

5. CARACTERIZAÇÃO DOS SUPORTES E DOS CONSTITUINTES

5.1. Murete de taipa

Um murete de taipa, realizado em Junho de 2012, no âmbito de um workshop promovido pela Associação Centro da Terra, foi utilizado para aplicação e avaliação de argamassas realizadas no âmbito desta dissertação e de outras que desenvolvem a mesma linha de investigação. Desta forma procedeu-se à caracterização possível do murete, antes de se proceder à aplicação.

Em metade de uma superfície exposta a Nascente foi possível aplicar duas argamassas desenvolvidas no âmbito da presente dissertação – a de referência e uma das com terra. Na outra metade procedeu-se a aplicações de duas argamassas ao traço volumétrico 1:3 só de cal e de cal com substituição parcial do agregado fino por terra, desenvolvida pela colega Inês Dias (Dias, 2013).

5.1.1. Resistência superficial por esclerómetro pendular

O ensaio da resistência superficial através do esclerómetro pendular foi realizado à parede de taipa onde posteriormente se aplicou o reboco. O ensaio baseou-se na norma ASTM C805 (ASTM, 2008).

O equipamento utilizado foi um esclerómetro modelo Schmidt PM. Possui uma massa conhecida que choca com a superfície em estudo, resultante de uma reação elástica por impulso. Através da quantidade de energia recuperada pelo ressalto, obtém-se um índice de dureza. “Quanto mais brando for o material, maior a quantidade de energia que ele absorve e menor a altura do ressalto” (Malanho & Veiga, 2010).

Para este ensaio sobre o murete não revestido seguiu-se o procedimento que se descreve de seguida. Escolheram-se os pontos a ensaiar, considerando a heterogeneidade da parede em estudo. Colocou-se o esclerómetro Schmidt PM (Figura 5.1) encostado ao reboco em cada um desses pontos, com o ponto de aplicação da massa alinhado com o aparelho. Libertou-se o pêndulo, através do botão de disparo, tendo em atenção que o equipamento esteve sempre bem encostado à superfície em estudo. Registaram-se as leituras dadas pelo esclerómetro em cada ponto (num total de 12 pontos).

Considera-se que as condições de humedecimento/secagem do murete de taipa podem ter influência nos resultados. O ensaio foi realizado com o murete muito húmido, após chuvas diárias contínuas. De acordo com o boletim meteorológico a humidade relativa do ar esteve sempre acima dos 90%. Nos dias dos ensaios o sol incidiu sobre o murete, pela manhã, intercalado com algumas nuvens.



Figura 5.1 – Ensaio de dureza superficial (esclerómetro)

A dureza superficial em cada zona da parede de taipa foi dada pela média das medições do esclerómetro (graus Vickers).

5.1.2. Condutibilidade térmica

A condutibilidade térmica permite conhecer a forma como um material homogéneo se deixa atravessar pelo calor.

Este ensaio foi realizado ao murete antes da colocação do reboco. Baseou-se no manual do equipamento ISOMET 2104 (Heat Transfer Analyser) e utilizou-se uma sonda de profundidade. O ensaio na parede difere do ensaio à argamassa aplicada sobre os tijolos (que será descrito no ponto 7.1.1.2) porque a sonda não pode ser utilizada “na vertical” e por isso foi necessário utilizar outro tipo de sonda.

Seguiu-se o procedimento que se descreve em seguida. Primeiro escolheram-se os pontos a ensaiar ao longo do murete (num total de 16 pontos), furou-se o murete nos pontos com um berbequim e uma broca com o diâmetro da sonda e uma profundidade igual ao comprimento da sonda (Figura 5.2). De seguida colocou-se a sonda em cada ponto escolhido e registaram-se as leituras dadas pelo equipamento, tendo-se em atenção os intervalos de valores adequados a cada sonda. Consoante o resultado obtido para cada ponto, verificou-se se este se encontrava no intervalo correspondente. No caso de exceder a gama de valores, repetiu-se o ensaio com outra sonda mais adequada.

Os valores obtidos são expressos em W/m.K e resultam da média de valores correspondentes medidos.

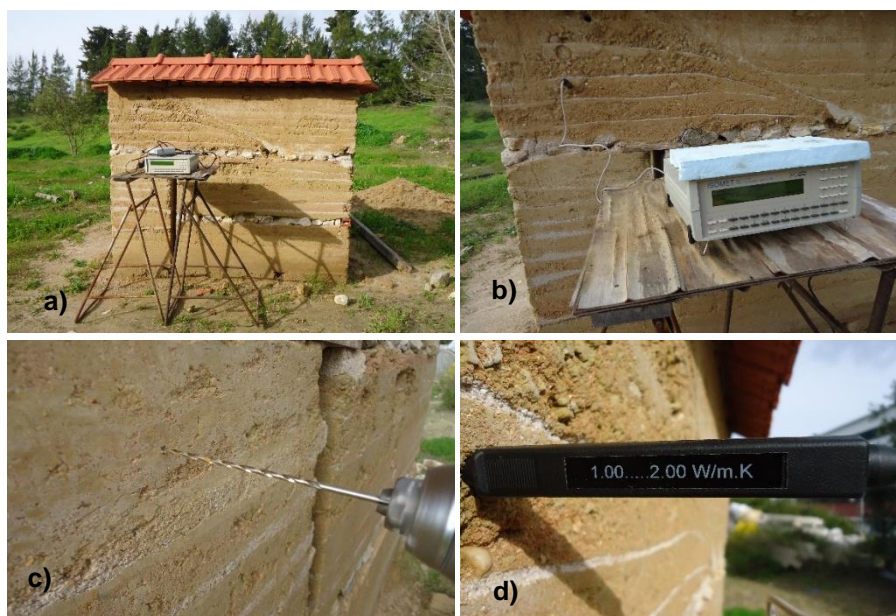


Figura 5.2 – Ensaio de condutibilidade térmica ao murete de taipa. a) Disposição do equipamento; b) Equipamento ISOMET 2104 (Heat Transfer Analyser); c) Furação dos pontos a ensaiar; d) Sonda de profundidade

5.1.3. Absorção de água sob baixa pressão por tubos de Karsten

O ensaio de absorção de água sob baixa pressão realizou-se de acordo com a ficha de ensaio Fe Pa 39 (LNEC, 2002) e no Test N.ºII.4 da RILEM (RILEM, 1980). A absorção de água sob baixa pressão através dos tubos de Karsten permite avaliar a permeabilidade de um material e também a possível microfissuração que pode ter sofrido, através da quantidade de água absorvida ao longo do tempo. Os pontos foram marcados no murete antes da realização do ensaio.

O procedimento adotado para este ensaio descreve-se em seguida. Mediram-se as áreas de contacto dos tubos de Karsten – graduados de 0 a 4 ml - com a argamassa. Depois fixaram-se os tubos com plasticina estanque no provete, vedando a toda a volta e garantindo a área de contacto central (Figura 5.3). Encheram-se os tubos até à marca 0 ml e começou-se a cronometrar o tempo (enchimento desfasado de 1 minuto entre tubos). Assim que a água chegou à marca 4 ml, voltou-se a encher cada tubo e anotou-se o tempo decorrido para absorção da água, sucessivamente até perfazer uma hora. Anotou-se a quantidade de água absorvida aos 5, 10, 15, 30 e 60 minutos de ensaio de cada um dos 8 tubos, ao longo de cada painel.



Figura 5.3 – Ensaio de absorção de água sob baixa pressão

Os resultados mostram a quantidade total de água absorvida por cada argamassa através da média entre os 8 tubos. Obtém-se o coeficiente de absorção aos 60 minutos através da equação 5.1:

$$ca = \frac{w_{m60} * 10^{-3}}{\varnothing_m^2 * \frac{\pi}{4} * 10^{-6} * \sqrt{60}} \quad (5.1)$$

onde,

ca – coeficiente de absorção ($kg/m^2\sqrt{min}$);

w_{m60} – quantidade média de água absorvida em 60 minutos (ml);

\varnothing_m – diâmetro médio do tubo em contacto com a argamassa (mm).

5.2. Tijolo furado de 7 cm

5.2.1. Condutibilidade térmica

O ensaio da condutibilidade térmica ao tijolo realizou-se com o equipamento ISOMET 2104 (Heat Transfer Analyser) e a respetiva sonda de superfície API 210412. O procedimento do ensaio baseou-se no manual do equipamento. A sonda emite um fluxo térmico e o equipamento avalia a resposta do material em estudo aos impulsos de fluxo térmico.

O procedimento adotado contempla os seguintes passos. Primeiramente o tijolo esteve numa sala condicionada à temperatura de $20 \pm 2^\circ\text{C}$ e à humidade relativa de $65 \pm 5\%$. Retirou-se o tijolo destas condições e colocou-se em cima de uma placa de XPS para garantir condições de fronteira homogêneas. Escolheram-se 6 pontos distintos para realizar o ensaio e colocou-se a sonda de superfície API 210412 em contacto com o tijolo, no primeiro ponto. Posto isto, selecionou-se a opção Thermal Conductivity do aparelho e deu-se início ao ensaio. O processo repetiu-se para os restantes pontos.

Os resultados da condutibilidade térmica (λ) foram expressos em W/m.K , e o valor de cada argamassa corresponde à média dos 6 valores lidos no equipamento

5.2.2. Absorção de água sob baixa pressão por tubos de Karsten

O ensaio de absorção de água sob baixa pressão realizou-se de acordo com os mesmos procedimentos utilizados no caso do murete (ficha de ensaio Fe Pa 39 (LNEC, 2002) e Test N.ºII.4 da RILEM (RILEM, 1980)). O ensaio foi realizado tal como descrito no ponto 5.1.3: com a diferença dos pontos ensaiados. Foram colocados 3 tubos no tijolo, na diagonal (Figura 5.4). O resultado é expresso pela média dos 3 valores em $\text{kg}/(\text{m}^2 \cdot \text{min}^{1/2})$.



Figura 5.4 – Ensaio de absorção de água sob baixa pressão ao tijolo

5.3. Caracterização dos constituintes

O conhecimento das características dos constituintes das argamassas é muito importante para a compreensão do seu comportamento. Como tal, foram feitos dois ensaios à terra: baridade e análise granulométrica por via seca

5.3.1. Baridade

A baridade foi determinada com base na norma NP EN 1097-3 (IPQ, 2000). A determinação da baridade dos constituintes é necessária para se poder medir rigorosamente o traço da argamassa em massa, correspondendo-o com o traço em volume. Como já foi referido, a baridade das areias e da cal aérea já era conhecida e, no âmbito desta dissertação, determinou-se a baridade da terra, que era desconhecida.

Este ensaio dividiu-se em duas partes. Primeiro determinou-se o volume do recipiente cilíndrico através do procedimento que se descreve seguidamente. Pesou-se o recipiente cilíndrico numa balança de precisão 0,1g e encheu-se o mesmo com água, colocou-se vidro e eliminaram-se bolhas de ar à superfície. Pesou-se novamente e registou-se a massa. Repetiu-se estas etapas mais duas vezes. Com o termómetro mediu-se a temperatura da água e observou-se na ficha de ensaio a densidade correspondente da água. Após esta primeira parte, realizou-se o ensaio propriamente dito. Em primeiro lugar colocou-se o material a ensaiar no funil, tapado na base, e com o equipamento em aço colocado num tabuleiro de modo a evitar perdas de material (a altura a que se encontra o funil é < 50 mm) (Figura 5.5a). Colocou-se o funil no suporte e, com o funil cheio, abriu-se a sua base e o material caiu por gravidade para dentro do recipiente cilíndrico colocado inferiormente (Figura 5.5b). Quando o recipiente ficou cheio, alisou-se a superfície e pesou-se. As etapas referidas foram repetidas mais duas vezes.



Figura 5.5 – a) Equipamento para o ensaio da massa volúmica; b) Material introduzido por gravidade no recipiente

O volume do recipiente é dado pela equação 5.2:

$$V_r = \frac{m_{r+a}}{\rho_a} \quad (5.2)$$

onde,

V_r – volume do recipiente cilíndrico [dm^3];

m_{r+a} – massa do recipiente com água [kg];

ρ_a – densidade da água (0,9976 para a temperatura de 23°C) [kg/dm^3].

A baridade do material é dada pela equação 5.3:

$$B = \frac{m_{r+m}}{V_r} \text{ [g/dm}^3\text{]} \quad (5.3)$$

onde,

B – baridade de dado material [g/dm³];

m_{r+m} – massa do recipiente cilíndrico com o material [g];

V_r – volume do recipiente cilíndrico [dm³].

Os valores usados foram a média das três medições de cada fase do ensaio.

5.3.2. Análise granulométrica

A análise granulométrica da terra foi feita pelo método de peneiração, por via seca, com base na norma NP EN 933-1 (IPQ, 2000a). *“A terra foi primeiro sujeita a moagem no moinho de maxilas, de forma a desagregar todos os torrões, inicialmente presentes, sendo depois homogeneizada com o auxílio de um repartidor”* (Gomes *et al.*, 2012d). A terra já tinha sido previamente analisada por granulometria por via húmida (Gomes *et al.*, 2012d). O conhecimento da curva granulométrica permite saber as percentagens de material de dimensões diferentes, o que possibilita que se entenda melhor o efeito que terá sobre a argamassa. Foram utilizados os peneiros desde a malha 0,038mm até à malha 4,750mm.

O procedimento adotado para determinar a granulometria descreve-se seguidamente. Secou-se a amostra a ensaiar durante 24 horas numa estufa à temperatura máxima de 60°C. Retirou-se depois para um tabuleiro aproximadamente 1 kg de amostra seca, medida numa balança de precisão 0,1g. Os peneiros de malha quadrada foram ordenados por forma a que o superior tenha abertura de malha imediatamente superior ao inferior e foi colocada uma base e uma tampa para evitar perda de material. Colocou-se a amostra de material no peneiro de maior abertura de malha e o conjunto de peneiros na máquina de vibração (Figura 5.6). A vibração horizontal da máquina e a ação da gravidade permitem que a amostra vá passando pelos peneiros, deixando retida a parte correspondente a cada malha nos diferentes peneiros. A vibração foi mantida durante 5 minutos e de seguida pesou-se o material retido em cada um dos peneiros, com o cuidado de remover o material retido na base do peneiro anterior com uma escova. Repetiu-se este procedimento mais duas vezes para se obter valores médios e minimizar os erros resultantes da possível perda de material.

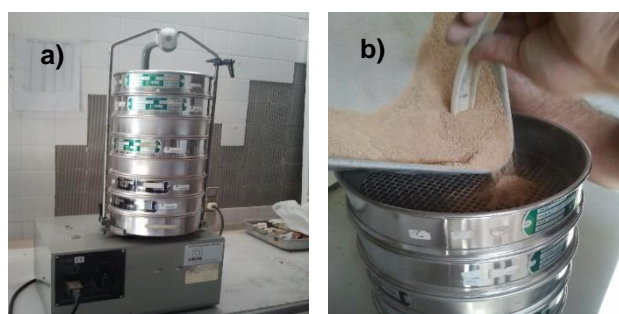


Figura 5.6 – a) Crivos de malha quadrada e máquina de vibração horizontal; b) Colocação do material no peneiro de malha superior

A percentagem de material retida em cada crivo é calculada através da equação 5.4:

$$\%retida = \frac{m_{peneiro}}{m_{amostra}} \times 100 \quad (5.4)$$

onde,

%retida – percentagem retida num determinado peneiro [%];

$m_{peneiro}$ – massa de material retido num determinado peneiro [g];

$m_{amostra}$ – massa total de amostra ensaiada [g].

Através das percentagens de material retido obtêm-se as percentagens de material acumulado e com os dados conseguidos com esta análise foi possível traçar a curva granulométrica (a seco) correspondente.

6. PREPARAÇÃO DAS ARGAMASSAS, CARACTERIZAÇÃO NO ESTADO FRESCO, PROVETES E CURA

Como referido anteriormente, o traço volumétrico base das argamassas produzidas é de 1:2. O ligante é constituído inicialmente apenas por cal aérea (argamassa de referência) mas a sua quantidade vai diminuindo percentualmente com a introdução de terra. O agregado é uma mistura de três areias (APAS12, APAS20 e APAS30). A terra foi acrescentada nas percentagens de 5%, 10%, 25% e 50%, em substituição de igual massa de cal e as quantidades das areias mantiveram-se iguais para as diferentes argamassas. A quantidade de água adicionada na primeira argamassa (referência) foi 1000 ml e conseguiu-se uma trabalhabilidade que se considerou adequada; nas restantes quatro argamassas aumentou-se essa quantidade para 1025 ml. As quantidades dos vários constituintes na formulação das argamassas apresentam-se no Quadro 6.1.

Quadro 6.1 – Quantidades de constituintes utilizados para cada argamassa

Designação	Massa [g]					Volume de água [ml]	Terra [% massa CL]
	APAS12	APAS20	APAS30	Solo argiloso	CL		
CL2	1129,6	1686	1665,6	0,0	579,2	1000	0
CL2_5t(L)	1129,6	1686	1665,6	29,0	550,2	1025	5
CL2_10t(L)	1129,6	1686	1665,6	57,9	521,3	1025	10
CL2_25t(L)	1129,6	1686	1665,6	144,8	434,4	1025	25
CL2_50t(L)	1129,6	1686	1665,6	289,6	289,6	1025	50

As designações das argamassas procuraram ser identificativas da sua constituição. Por exemplo CL2_5t(L) refere-se a uma argamassa de cal aérea (CL) de traço volumétrico 1:2, onde foi adicionada 5% de terra (t) como substituto de 5% da massa do ligante (Lime).

Na realização de argamassas é de grande importância conhecer com rigor os processos de produção e de preparação dos provetes porque todos eles irão influenciar o comportamento e as características de cada argamassa.

6.1. Amassaduras

As amassaduras foram efetuadas com base na norma europeia EN 1015-2 (CEN, 1998) mas seguindo o procedimento definido por Faria (2011) no âmbito da campanha experimental definida para o projeto METACAL.

Primeiramente pesaram-se os constituintes sólidos numa balança com precisão de 0,1g. Colocou-se num tabuleiro as areias e no meio a cal aérea. Misturou-se com cuidado e com a ajuda de uma pá e de seguida introduziu-se no recipiente da misturadora de laboratório previamente humedecido. Utilizaram-se duas provetas para medir a quantidade de água, consoante a quantidade necessária: uma proveta de 1000 ml e uma proveta de 50 ml. Com todos os materiais pesados e medidos, colocou-se então o recipiente na misturadora, apenas com os constituintes sólidos. Esta foi colocada em funcionamento a uma velocidade lenta durante 150 segundos. A água acrescentou-se através de um funil durante os primeiros 15 segundos (Figura 6.1). Passados os 150 segundos parou-se a máquina e envolveu-se a argamassa manualmente com a ajuda de uma colher de silicone, de modo a misturar bem o material que se encontrava junto às paredes do recipiente. Colocou-se novamente a misturadora em funcionamento, à mesma velocidade, durante mais 30 segundos. Retirou-se o recipiente da misturadora e, antes de se efetuar qualquer ensaio, misturou-se a argamassa novamente e manualmente com uma colher de pedreiro durante 5 a 10 segundos para garantir que todo o material se encontrava homogêneo. As condições ambientais do laboratório na realização das argamassas foram de 24°C de temperatura e 57-61% de humidade relativa.



Figura 6.1 – Introdução de água na cuba (em laboratório e no exterior)

A amassadura efetuada às argamassas para aplicação no murete foi feita com um berbequim, dentro de um balde com uma capacidade superior à da cuba utilizada em laboratório (Figura 6.1). A sequência e tempo de amassadura foram idênticos.

6.2. Ensaio às argamassas no estado fresco

6.2.1. Consistência por espalhamento

A medição do espalhamento realizou-se com base na norma EN 1015-3 (CEN,1999). O espalhamento quantifica a trabalhabilidade e a consistência de uma argamassa. No tipo de argamassas utilizado no presente trabalho consideraram-se à partida admissíveis valores de espalhamento na ordem dos 150 ± 10 mm, correspondendo a argamassas trabalháveis. Assim é possível determinar a quantidade de água necessária.

PREPARAÇÃO DAS ARGAMASSAS, CARACTERIZAÇÃO NO ESTADO FRESCO, PROVETES E CURA

O ensaio de espalhamento seguiu o procedimento descrito a seguir. Em primeiro lugar, deram-se 10 pancadas na mesa de espalhamento, antes do ensaio propriamente dito (esta não tinha sido utilizada nas 24h anteriores). De seguida limpou-se a mesa de espalhamento e o molde cónico truncado (Figura 6.2a) com um pano húmido para humedecer a superfície de contacto com a argamassa. Colocou-se o molde cónico centrado na mesa de espalhamento e adicionaram-se duas camadas de argamassa, cada uma compactada 20 vezes com um pilão. Rasou-se a superfície com uma colher de pedreiro para retirar o excesso de material e limpou-se os possíveis vestígios de água ou argamassa que se encontravam à volta do cone e na mesa de espalhamento (Figura 6.2b). Retirou-se o molde com cuidado e deram-se 15 pancadas em 15 segundos, por rotação da manivela da mesa, com o ritmo de uma pancada por segundo. Por fim, com o auxílio da craveira, mediu-se o diâmetro da argamassa espalhada em duas direções ortogonais, de preferência na maior e na menor dimensão. (Figura 6.2c).

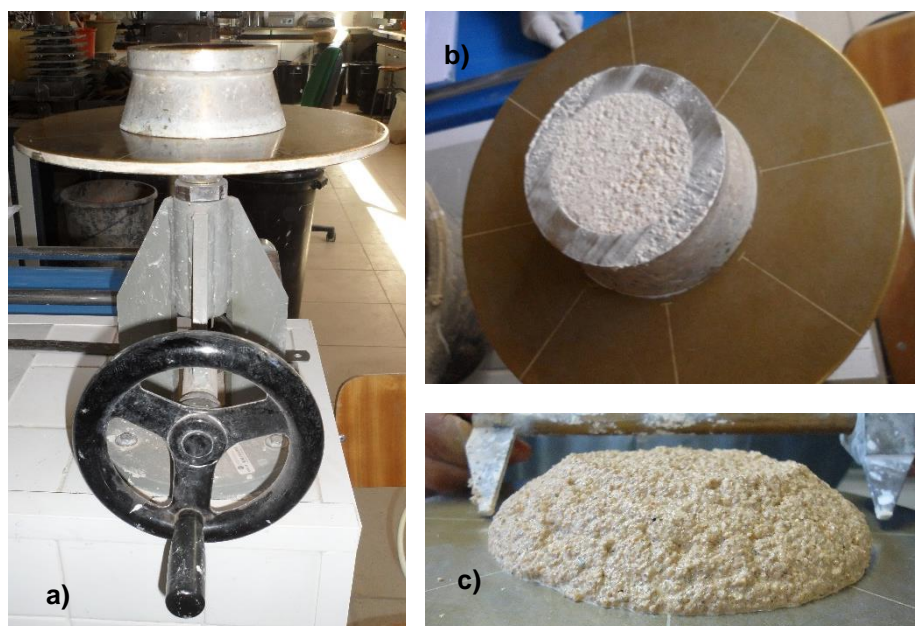


Figura 6.2 – a) Mesa de espalhamento e molde cónico; b) Molde com argamassa; c) Medição do diâmetro de espalhamento

O resultado deste ensaio foi dado pela média das medições nas amassaduras 1, 2, 3 e 4 de cada argamassa.

6.2.2. Massa volúmica

Este ensaio foi realizado à argamassa no estado fresco, com base na norma europeia EN 1015-6 (CEN, 1998a). O ensaio pretende avaliar o efeito da introdução de diferentes quantidades de terra na massa volúmica da argamassa no estado fresco.

A realização deste ensaio seguiu o seguinte procedimento. Primeiro realizou-se a pesagem do recipiente cilíndrico vazio, com capacidade de 1L, numa balança de precisão 0,1g. A seguir, depois de devidamente preparada, a argamassa foi colocada no interior do recipiente, até metade da capacidade

de cal aérea e terra

A influência da terra como ligante

do mesmo. A compactação foi feita através da oscilação do recipiente em quatro direções alternadas. Deixando o recipiente de um lado apoiado, levantou-se do lado oposto de uma altura de cerca de 3cm e deixou-se cair, repetindo para cada uma das restantes três direções. Encheu-se completamente o recipiente e voltou-se a compactar do mesmo modo. Retirou-se a argamassa em excesso, rasando-se com a colher de pedreiro o bordo superior do recipiente (Figura 6.3a). Por fim, procedeu-se à pesagem do recipiente com argamassa no interior, previamente limpo pelo exterior com um pano (Figura 6.3b).

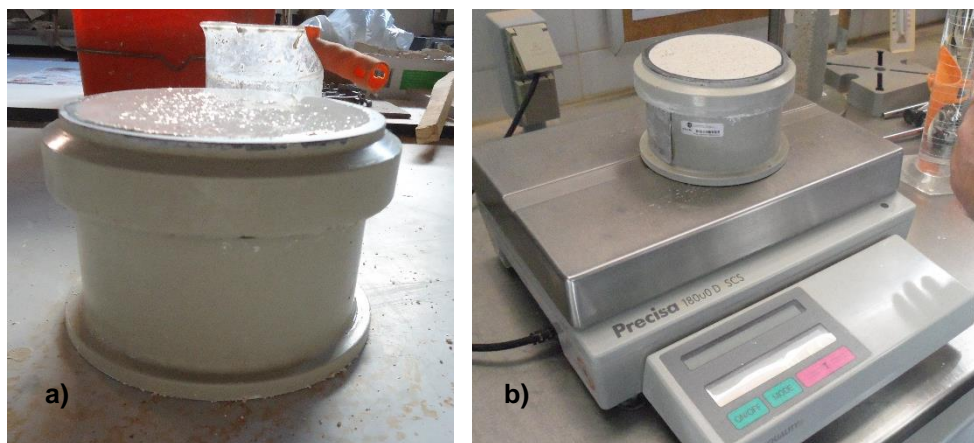


Figura 6.3 – a) Molde com argamassa; b) Pesagem do conjunto

A massa volúmica da argamassa no estado fresco foi determinada pela equação 6.1:

$$\rho = \frac{M_{r+a} - M_r}{V} \quad (6.1)$$

onde,

ρ – massa volúmica da argamassa no estado fresco [kg/m^3];

M_{r+a} – massa do recipiente cilíndrico totalmente preenchido com argamassa [kg];

M_r – massa do recipiente cilíndrico [kg];

V – volume do recipiente cilíndrico, previamente conhecido ($1 \text{ l} = 1 \times 10^{-3} \text{ m}^3$).

O resultado deste ensaio consiste na média das duas medições, em duas amassaduras distintas, em kg/m^3 .

6.2.3. Teor de ar incorporado

Este ensaio foi realizado à argamassa no estado fresco, com base na norma europeia EN 1015-7 (CEN, 1998b). Esta norma define dois métodos de determinação do teor de ar incorporado: método da pressão e método do álcool, aplicáveis para argamassas com menos de 20% de teor de ar incorporado no primeiro método e mais de 20% no segundo. Nesta campanha utilizou-se o método da pressão que considera que o volume ocupado por água na argamassa corresponde ao teor de ar incorporado. A avaliação deste parâmetro é importante para relacionar a maior percentagem de ar com a trabalhabilidade, a compacidade e as resistências mecânicas.

PREPARAÇÃO DAS ARGAMASSAS, CARACTERIZAÇÃO NO ESTADO FRESCO, PROVETES E CURA

Este ensaio seguiu o procedimento que se descreve de seguida (após a calibração do aparelho). Colocou-se a argamassa fresca no contentor (próprio para determinação do teor de ar, Figura 6.4) em duas camadas, cada uma delas compactada através da oscilação do recipiente em quatro direções alternadas. Retirou-se o excesso rasando-se a superfície com a talocha e de seguida limpavam-se os bordos do recipiente com um pano húmido. Fixou-se a superfície do contentor ao equipamento de medição do teor de ar com os grampos e expulsou-se o ar interior através da introdução de água, através de um esguicho, na válvula A, até esta sair sem bolhas através da válvula B. Depois ajustou-se o ponteiro do manómetro, bombeando ar para a câmara superior, para permitir a descida do ponteiro e assim o seu ajuste ao zero. Posto isto, fecharam-se as válvulas A e B e pressionou-se a válvula de escape durante aproximadamente 20 segundos (para estabilização), dando-se umas leves pancadas no manómetro. A leitura é dada pelo mostrador do manómetro arredondado a 0,1%.

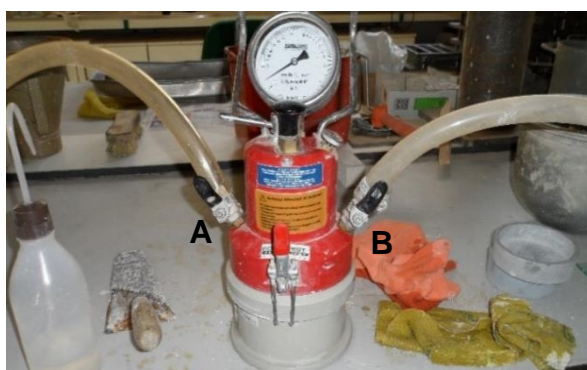


Figura 6.4 – Equipamento para determinação do teor de ar

O resultado deste ensaio consiste na média das duas medições, em duas amassaduras distintas, em %.

6.2.4. Retenção de água

Este ensaio foi realizado à argamassa no estado fresco, com base na ficha de ensaio Fe 32 do DEC/FCT-UNL, que se baseia na norma europeia prEN 1015-8 (CEN, 1999b). Com a realização deste ensaio, é possível conhecer a quantidade de água que fica retida na argamassa, depois de parte da mesma ser absorvida pelo suporte onde é aplicada. O resultado deste ensaio é indicado em percentagem da água inicial retida na argamassa.

“A retenção de água por parte de uma argamassa é uma característica fundamental, por poder condicionar o desempenho efetivo dos constituintes que compõem a argamassa e as respetivas condições de aplicação” (Faria, 2004).

Este ensaio seguiu o procedimento que se descreve em seguida. Procedeu-se previamente à pesagem do molde vazio - de dimensões interiores de 100 mm de diâmetro e 25 mm de altura - e de 8 folhas de papel de filtro, estando ambos limpos e secos, numa balança de precisão 0,001g. Encheu-se

o molde até metade com a colher de pedreiro. A compactação foi feita através da oscilação do recipiente em quatro direções alternadas, levantando o bordo de uma altura definida de 2 cm e mantendo o bordo oposto apoiado. Encheu-se o restante molde e compactou-se do mesmo modo. Posto isto, retirou-se o excesso de argamassa com a colher de pedreiro, rasando-se a superfície do molde, e limpou-se o molde (Figura 6.5a). Seguiu-se a pesagem do molde preenchido. Cobriu-se a superfície da argamassa com 2 gazes de algodão e forma circular e colocou-se o papel de filtro por cima destas (Figura 6.5b). Cobriu-se com um vidro de 5 mm de espessura e secção quadrada (110 mm de lado) e de seguida o conjunto foi invertido e colocado sobre uma superfície plana, sendo colocado um peso de 2 kg em cima do conjunto, durante 10 minutos \pm 10 segundos (Figura 6.5c). Ao fim deste tempo, o conjunto foi novamente invertido e colocado na posição inicial, sendo o papel de filtro retirado e pesado de novo. No caso de a massa de água absorvida pelo papel de filtro ser superior a 10 g, o ensaio tinha de ser repetido com mais folhas de papel de filtro, respeitando-se o facto de cada folha não poder absorver mais de 10 g de água.



Figura 6.5 – a) Molde com argamassa; b) Preparação do conjunto para o ensaio; c) Conjunto invertido com um peso de 2kg

A retenção de água é dada por uma percentagem da água presente inicialmente na argamassa, que depende da massa de água que constitui a argamassa colocada dentro do molde, dada pela equação 6.2:

$$m_a = \frac{a_g * (m_c - m_v)}{\sum_{i=1}^n c_i + a_g} \quad (6.2)$$

onde,

m_a – massa de água que constitui a argamassa colocada no molde [g];

a_g – massa de água usada na amassadura [g];

c_i – massa de cada um dos constituintes utilizados [g];

m_c – massa do molde com argamassa [g];

m_v – massa do molde vazio [g].

Obtém-se a retenção de água através da equação 6.3:

$$R = \frac{m_a - (m_h - m_f)}{m_a} * 100 \quad (6.3)$$

onde,

R – retenção de água (%);

m_a – massa de água que constitui a argamassa colocada no molde [g];

m_h – massa de 8 folhas de papel de filtro no final do ensaio [g];

m_f – massa de 8 folhas de papel de filtro secas [g].

O resultado deste ensaio consiste na média das duas medições, em duas amassaduras distintas, em %.

6.3. Preparação dos provetes de argamassa e condições de cura

Provetes prismáticos

Os **provetes prismáticos** foram usados na maioria dos ensaios à argamassa no estado endurecido, tais como: variações dimensionais, módulo de elasticidade dinâmico, resistência à tração por flexão e à compressão, porosidade aberta e massa volúmica aparente, porosimetria de mercúrio, absorção de água por capilaridade, secagem e resistência aos sulfatos. Cada molde originou 3 provetes de dimensões aproximadas de 40 x 40 x 160 mm (Figura 6.6). No entanto nem todos os moldes são exatamente iguais, devido a ligeiras folgas, e como tal, foram medidas as dimensões de cada um antes da colocação da argamassa no seu interior. A preparação dos provetes seguiu o procedimento definido por Faria (2011) no âmbito da campanha experimental definida para o projeto METACAL que se baseia na norma EN 1015-2 (CEN, 1998). Depois da medição dos moldes foi aplicado óleo descofrante em todas as faces. A argamassa fresca foi colocada em duas camadas no molde, tendo cada camada sofrido uma compactação mecânica que correspondeu a “20 pancadas” na máquina de compactação, por forma a eliminar vazios existentes no interior da argamassa e corresponder à compactação de uma aplicação. Para finalizar, rasou-se a superfície com uma talocha, com movimentos de serra. Com isto, os provetes ficaram prontos para iniciar o processo de cura.



Figura 6.6 – Moldes prismáticos

Provetes em tijolo

As argamassas aplicadas no **suporte de tijolo** serviram para fazer ensaios de resistência superficial, velocidade por ultrassons, condutibilidade térmica, absorção de água sob baixa pressão e

de cal aérea e terra

A influência da terra como ligante

porosimetria. O procedimento de aplicação descreve-se em seguida. Em primeiro lugar colocou-se um molde pré executado com o tamanho aproximado do tijolo e com uma altura que corresponde a 2 cm de espessura para o reboco (Figura 6.7a). De seguida humedeceu-se a superfície onde foi aplicada a argamassa para evitar a perda de água desta por elevada sucção do suporte (Figura 6.7b). Por cima do molde colocou-se um novo molde, mas neste caso com uma altura de 70 cm a partir da qual se “deixa cair” a argamassa para cima do tijolo, de modo a simular o efeito da energia de aplicação do reboco, com alguma projeção (Figura 6.7c). Por fim retirou-se o segundo molde, regularizou-se a superfície com a colher de pedreiro e rasou-se com a talocha pelo nível do primeiro molde (Figura 6.7d). Retirou-se o primeiro molde e o tijolo revestido ficou pronto para iniciar o processo de cura (Figura 6.7e).



Figura 6.7 – a) Tijolo no primeiro molde; b) Aspersão do tijolo; c) Aplicação da argamassa com o segundo molde; d) Rasagem da argamassa; e) Tijolo preparado para iniciar a cura

Os provetes prismáticos e sobre tijolo produzidos foram submetidos apenas a uma cura que decorreu nas condições designadas de cura *standard*, com aspersão nos primeiros dias. Esta cura consistiu na colocação dos provetes numa sala fechada e condicionada mecanicamente a uma temperatura de $20 \pm 2^\circ\text{C}$ e uma humidade relativa de $65 \pm 5\%$, no DEC/FCT-UNL. Realizou-se aspersão durante 4 dias seguidos, aproximadamente à mesma hora (Figura 6.8), do 2º ao 5º dia de idade dos provetes. A desmoldagem dos provetes prismáticos efetuou-se após 7 dias; mantiveram-se nas mesmas condições durante o restante tempo de cura (até aos 28 dias e os 90 dias).



Figura 6.8 – a) Aspersão dos provetes prismáticos; b) Aspersão do provete em suporte de tijolo

Reboco do murete de taipa

O revestimento aplicado ao **murete de taipa** realizou-se em duas camadas, aplicadas em painéis do murete expostos a Este e com dimensões aproximadas de 50x160 mm. Primeiro aplicou-se o salpisco com as quantidades iguais às argamassas de laboratório, mas com mais 10% de água, com uma espessura de aproximadamente 1cm e irregular; uma semana depois aplicou-se a camada de base com a mesma quantidade de água das argamassas realizadas em laboratório, aplicada com uma espessura de 1 a 1,5 cm. O aperto e a regularização do reboco foram feitos com uma talocha. Nos dias seguintes não foi necessário reapertar pois não se detetaram fissuras visíveis. Devido às condições atmosféricas que se mantiveram naquele período (chuvas intensas e constantes) não houve necessidade de aspergir o reboco por forma a simular o início da cura igual à das camadas aplicadas sobre os tijolos (Figura 6.9). Os rebocos não estavam em contacto com o solo (foi reservada uma altura de 10 cm) nem com os painéis adjacentes.



Figura 6.9 – Aplicação do reboco no murete de taipa

7. CARACTERIZAÇÃO DAS ARGAMASSAS NO ESTADO ENDURECIDO

7.1.1. Provetes em suporte de tijolo (28 e 90 dias)

7.1.1.1 Dureza superficial por durómetro Shore A

O procedimento deste ensaio baseia-se na norma ASTM D2240 (ASTM, 2000). O ensaio de dureza superficial foi efetuado à argamassa aplicada nos provetes em suporte de tijolo, no estado endurecido. Apesar do durómetro ter sido desenvolvido inicialmente para a indústria automóvel (pneus), foi posteriormente reformulado para a utilização noutros materiais, numa escala de *Shore A* a *Shore D*, do mais macio para o mais duro. O *Shore A*, adequado para materiais mais macios, mede a resistência à penetração de um pino pressionado na superfície de estudo. Os tijolos ensaiados correspondem aos efetuados na primeira amassadura. A dureza superficial foi estudada para a idade de 28 e 90 dias. Este equipamento foi gentilmente disponibilizado pelo Núcleo de Isolamentos e Revestimentos do LNEC.

O ensaio seguiu o seguinte procedimento. Retirou-se o tijolo da sala condicionada e passou-se uma escova na superfície da argamassa, para eliminar material solto. Pressionou-se o durómetro *Shore A*, PCE Group (Figura 7.1a) e registou-se o valor obtido (Figura 7.1b). Repetiu-se a medição num total de 10 pontos diferentes da superfície de argamassa.



Figura 7.1 – a) Durómetro Shore A; b) Medição com o durómetro

O resultado deste ensaio corresponde à média dos 10 valores obtidos para cada tijolo.

7.1.1.2 Condutibilidade térmica

O ensaio da condutibilidade térmica da argamassa sobre os provetes de tijolo realizou-se com o equipamento ISOMET 2104 (Heat Transfer Analyser) e a respetiva sonda de superfície API 210412, que já tinha sido utilizada para caracterização do tijolo. O equipamento define uma espessura mínima de 2 cm de material cuja condutibilidade térmica (λ) se pretende determinar, o que estava no limite dos provetes de argamassa sobre tijolo. Alguma influência que possa ter sido introduzida pelo suporte de

de cal aérea e terra

A influência da terra como ligante

tijolo é pelo menos uniforme entre os diferentes provetes. A condutibilidade térmica foi estudada às idades de 28 e 90 dias.

O equipamento e o procedimento foram descritos no ponto 5.2.1 e o processo repetiu-se para os restantes pontos e para cada um dos 5 tijolos revestidos com argamassas distintas (da primeira etapa de amassaduras) (Figura 7.2).



Figura 7.2 – Equipamento para a realização do ensaio de condutibilidade térmica: ensaio à argamassa aplicada aos tijolos

Os resultados da condutibilidade térmica (λ) foram expressos em W/m.K, e o valor de cada argamassa corresponde à média dos 6 valores lidos no equipamento.

7.1.1.3 Velocidade de propagação dos ultrassons

O ensaio da velocidade de propagação dos ultrassons foi realizado com base na ficha de ensaio Fe Pa 43 (LNEC, 2010). Este ensaio permite avaliar a compacidade da argamassa e por vezes identificar zonas fissuradas ou com menor aderência. A velocidade de propagação dos ultrassons através do revestimento de argamassa dos tijolos foi estudada às idades de 28 e 90 dias.

Para este ensaio realizaram-se os passos que se descrevem a seguir. Montou-se o equipamento de ultrassons (Figura 7.3a). Mediram-se e marcaram-se 6 pontos (de A a F) numa folha do tamanho do provete (Figura 7.3b). Aplicou-se o gel condutor na ponta dos transdutores e colocou-se o transdutor emissor no ponto A e o transdutor recetor no ponto B. Mediu-se o valor do tempo decorrido (Figura 7.3c). Efetuaram-se medições para os restantes pontos. Depois colocou-se o transdutor emissor no ponto F e o transdutor recetor nos restantes pontos, e procedeu-se do mesmo modo descrito anteriormente.

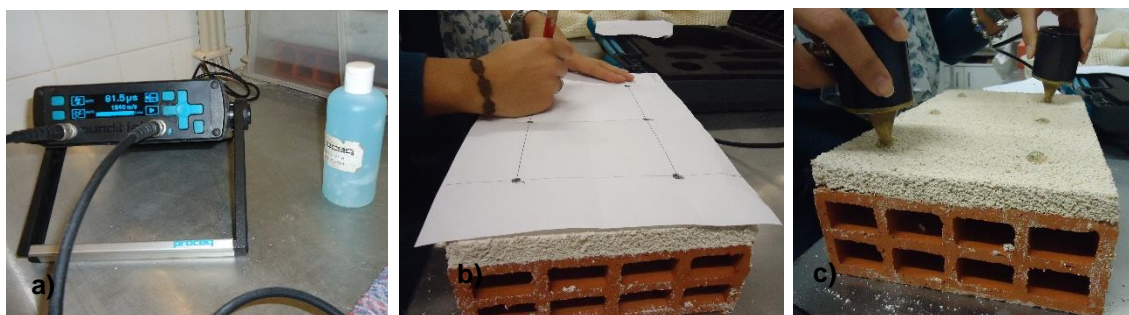


Figura 7.3 – a) Equipamento de medição dos ultrassons; b) Marcação dos pontos a ensaiar; c) Medição através dos transdutores

Os dados obtidos do tempo decorrido permitem, através das distâncias conhecidas, saber a velocidade de propagação dos ultrassons dada pela equação 7.1:

$$v_{us} = \frac{d}{t} \quad (7.1)$$

onde,

v_{us} – velocidade dos ultrassons [m/s];

d – distância percorrida [m];

t – tempo decorrido [s].

Admite-se que em distâncias mais curtas o percurso das ondas ultrassónicas ocorra apenas através da argamassa e que em distâncias maiores, o percurso possa atingir o suporte de tijolo vazado.

7.1.1.4 Absorção de água sob baixa pressão por tubos de Karsten

O ensaio de absorção de água sob baixa pressão realizou-se de acordo com a ficha de ensaio Fe Pa 39 (LNEC, 2002) e o Test N.ºII.4 da RILEM (RILEM, 1980), à semelhança de casos anteriores. Este ensaio foi feito à argamassa aplicada no tijolo, às idades de 28 e 90 dias. Tratou-se de um dos últimos ensaios a ser realizado nesta fase por alterar as características de humidade da argamassa. Foram ensaiados os 2 tijolos revestidos com cada argamassa, que correspondem a argamassas respetivamente da 1ª e 2ª etapas de amassadura. O ensaio foi realizado tal como descrito no ponto 5.2.2, com a diferença dos pontos ensaiados. Foram colocado 3 tubos em cada tijolo, na diagonal (Figura 7.4). Os resultados vêm da média dos 6 tubos.

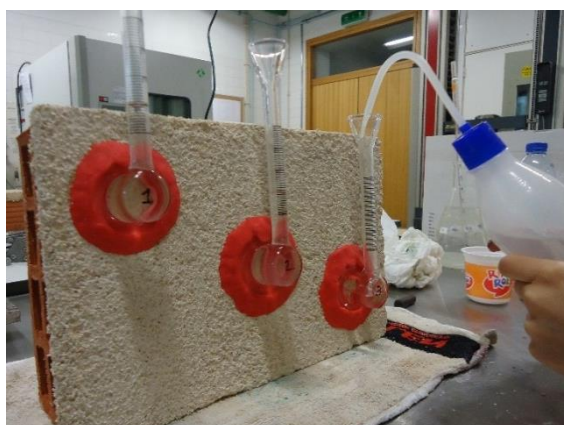


Figura 7.4 – Ensaio de absorção de água sob baixa pressão em argamassa aplicada no tijolo

7.1.1.5 Porosimetria e porosidade aberta de mercúrio

Este ensaio consiste na intrusão de mercúrio numa amostra de argamassa, com recurso a um porosímetro “Autopore IV” da Micrometrics, que contém duas portas de baixa pressão e uma porta de alta pressão (Rato, 2006).

A segurança em termos de manuseamento do mercúrio foi assegurada através da realização do ensaio em ambiente condicionado a uma temperatura sempre inferior a 23°C, no Laboratório de

Análise de Microestrutura do DEC/FCT-UNL. As amostras utilizadas foram retiradas de excertos da argamassa aplicada aos tijolos (Figura 7.5a).

O ensaio contemplou o procedimento que se descreve de seguida. Efetuou-se um desgaste nas amostras dos provetes de modo a serem inseridas no penetrómetro de volume 5 cm^3 (Figura 7.5c) e colocou-se na estufa ventilada, a 40°C durante pelo menos 24h. Retiraram-se os provetes da estufa e colocou-se cada amostra num exsicador durante 30 minutos para arrefecer à temperatura ambiente. Pesou-se cada amostra e colocou-se no penetrómetro de sólidos, envolvendo o bordo com um óleo de selagem. Colocou-se a tampa no penetrómetro, lubrificou-se a haste e pesou-se o conjunto, numa balança de precisão 0,001g. Deu-se início ao ensaio através da colocação do conjunto numa das portas de baixa pressão do porosímetro “Autopore IV” da Micrometrics (Figura 7.5b). Introduziram-se as massas no programa de cálculo do aparelho (AutoPore 9500) para que este calculasse o volume de mercúrio introduzido em cada patamar. Durante o ensaio a amostra ficou condicionada pelo aparelho a uma pressão de $100 \text{ }\mu\text{mHg}$ durante 5 minutos, até estabilizar. Introduziu-se o mercúrio até preencher toda a zona em volta do provete e iniciou-se o processo de intrusão, que se efetuou através da subida da pressão em 15 patamares pré-definidos entre 0,0138 MPa e 0,2068 MPa. Depois da análise com baixa pressão retirou-se o penetrómetro e pesou-se a massa do conjunto. Seguidamente iniciou-se o ensaio a alta pressão, através da colocação do penetrómetro na porta destinada; neste caso foram 67 os patamares de pressão de intrusão, entre os valores de 0,2758 MPa e 206,8427 MPa. A extrusão da pressão ocorre na continuação do ensaio, utilizando 27 patamares com valores entre 206,8427 MPa e 0,1034 MPa; *“em cada patamar de pressão, foi determinado um tempo de espera de 15 segundos na análise de baixa pressão e de 30 segundos na análise de alta pressão”* (Rato, 2006).



Figura 7.5 – Ensaio de porosimetria de mercúrio: a) corte da amostra retirada do suporte de tijolo; b) porosímetro “Autopore IV” da Micrometrics; c) penetrómetro

Os dados obtidos pelo ensaio relacionam-se permitindo saber as quantidades de poros de diferentes dimensões, existentes na argamassa através da percentagem de mercúrio que entra nos poros.

7.1.2. Provetes prismáticos (90 dias)

Os ensaios propriamente ditos efetuados aos prismas de argamassa aos 90 dias de cura seguiram a ordem que se apresenta na Figura 7.6. Os provetes para preparação de amostras para análise por XRD e TGA-DTG foram preparados (secos e acondicionados em sacos de plástico estanques e

sem ar após o ensaio de resistência à compressão) mas, por questões logísticas, as respectivas análises só vão ser efetuadas posteriormente à entrega da presente dissertação.

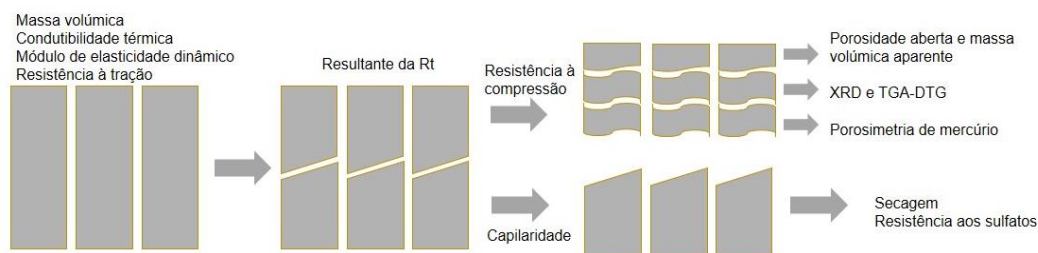


Figura 7.6 – Esquema de ensaios aos prismas

7.1.2.1 Massa volúmica

Os provetes prismáticos foram medidos e pesados aos 7, 28 e 90 dias de cura, por forma a determinar a massa volúmica.

Utilizou-se uma craveira digital para medir o comprimento, a altura e a largura de cada um dos provetes, e uma balança de precisão 0,001g para medir a massa dos mesmos. Com estes dados procedeu-se ao cálculo das massas volúmicas dos provetes às diferentes idades. Os 7 dias correspondem ao dia da desmoldagem. O material utilizado e os provetes após a desmoldagem encontram-se na Figura 7.7. Os valores dos 90 dias de cura serviram depois para o ensaio do módulo de elasticidade dinâmico.



Figura 7.7 – a) Material utilizado na desmoldagem; b) Provetes após a desmoldagem

7.1.2.2 Condutibilidade térmica

O ensaio da condutibilidade térmica dos provetes prismáticos foi realizado tal como descrito no ponto 5.2.1. No caso destes provetes garante-se a espessura mínima de 2 cm mas acontece que a sonda de superfície utilizada tem uma área superior à área de contacto com o prisma (diâmetro de 6 cm em contacto com face com 4 cm de largura). Como tal, os resultados obtidos só são totalmente comparáveis entre as argamassas estudadas e com ensaios realizados nas mesmas condições. Efe-

tuaram-se medições em duas faces de 3 provetes da mesma argamassa (da segunda etapa de amassaduras). Como não se obtiveram grandes diferenças entre os valores, foi realizada uma medição em cada provete, num total de 3 medições por argamassa (Figura 7.8).

Os resultados da condutibilidade térmica (λ) foram expressos em W/m.K, e o valor de cada argamassa corresponde à média dos 3 valores lidos no equipamento.



Figura 7.8 – Ensaio de condutibilidade térmica aos provetes prismáticos

7.1.2.3 Módulo de elasticidade dinâmico (por equipamento específico)

Antes da realização dos ensaios de resistência à tração por flexão e à compressão (ensaios destrutivos), determina-se o módulo de elasticidade dinâmico.

Este ensaio foi realizado com base na norma NP EN 14146 (IPQ, 2007) para pedra natural, através da medição da frequência de ressonância fundamental, e utilizaram-se os dados geométricos e a massa de cada provete aos 90 dias aferida para determinação da variação dimensional e da massa volúmica das argamassas endurecidas.

Para a realização deste ensaio procedeu-se às etapas que se descrevem em seguida. Retirados os provetes da sala condicionada, onde se procedia à cura, colocou-se cada um dos 3 provetes de cada argamassa no suporte existente no equipamento “ZEUS Resonance Meter” (ZRM001) (Figura 7.9), ficando um topo do provete em contacto com o emissor de vibrações e a outra ponta com o recetor. Inseriram-se as características do provete no programa de cálculo do equipamento: a massa em grama e as dimensões em milímetros (referidas no ponto 7.1.2.1); deu-se início ao programa de software do equipamento. Registou-se a leitura do módulo de elasticidade determinado (automaticamente ou eliminando interferências) e rodou-se o provete de modo a retirar 4 *medições com os topos* ou as faces do provete colocados em posições diferentes (Figura 7.9).

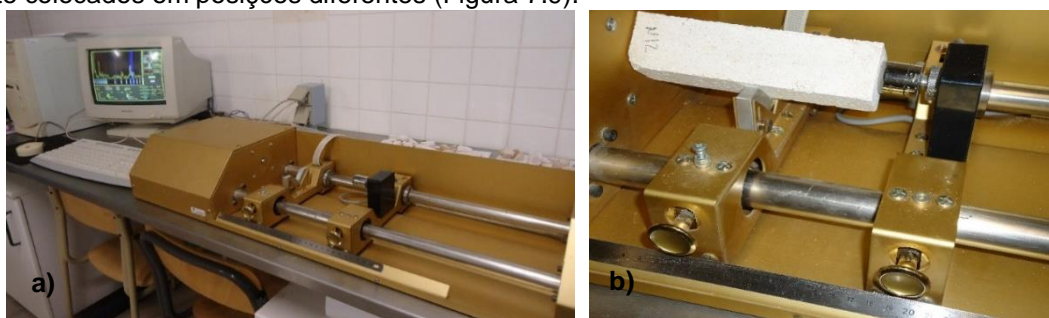


Figura 7.9 – a) Equipamento “ZEUS Resonance Meter”; b) Medição do módulo de elasticidade dinâmico

Os resultados correspondem à média dos valores de E_d obtidos para os 3 provetes de cada argamassa. O programa de cálculo utilizado regista o valor do módulo de elasticidade seguindo a equação 7.2.

$$E_d = (2 \times L \times f_0)^2 \times \frac{\rho}{g} \times 10^{-6} [MPa] \quad (7.2)$$

onde,

L – comprimento do provete [m];

f_0 – frequência de ressonância longitudinal [Hz];

ρ – peso específico [N/m^3];

g – aceleração da gravidade [$9,80665 \text{ m/s}^2$].

7.1.2.4 Resistência à tração por flexão e à compressão

Seguidamente ao ensaio de determinação do módulo de elasticidade dinâmico, fez-se o ensaio de resistência à tração por flexão. Este ensaio foi realizado com base na norma EN 1015-11 (CEN, 1999a).

Para este ensaio seguiu-se o procedimento descrito em seguida. Preparou-se a máquina universal Zwick/Rowell (Figura 7.10a), com a introdução da célula de carga de 2 kN no dispositivo para ensaio de flexão por três pontos (Figura 7.10b). Colocou-se um provete sobre os apoios distanciados de 100 mm entre si. Teve-se o cuidado de colocar a face rugosa disposta lateralmente para permitir que a carga atuasse numa superfície lisa, sem irregularidades, de modo a não influenciar os resultados. Foi garantida a perpendicularidade entre o provete e a célula da carga. Deu-se início ao programa de software da máquina, que incrementou uma velocidade de 0,2 mm/min à carga. O software mostra um gráfico da força aplicada [N] em função do tempo [s] e também a força máxima [F_f] aplicada que permitiu a rotura do provete;

A resistência à tração por flexão R_t [MPa] é obtida através da equação 7.3 indicada na norma EN 1015-11 (CEN, 1999a), em que F_f [N] é a força máxima obtida pelo software:

$$R_t = 1,5 \times \frac{F_f \times l}{bd^2} [MPa] \quad (7.3)$$

onde:

l – distância entre apoios, em milímetros [100 mm];

$b = d$ – lado da secção quadrada do provete, em milímetros [40 mm].

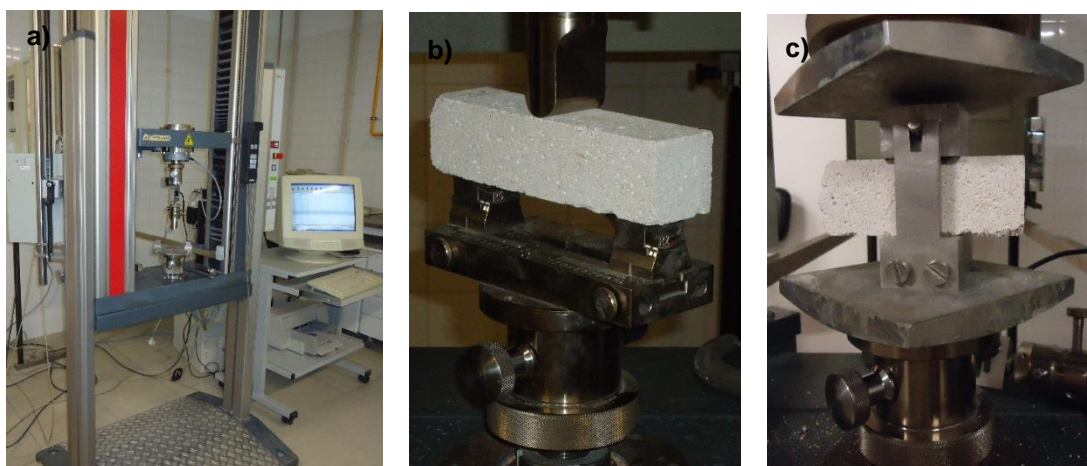


Figura 7.10 – a) Equipamento de medição das resistências mecânicas; b) Ensaio de resistência à tração por flexão; c) Ensaio de resistência à compressão

Em seguida é realizado o ensaio de resistência à compressão com base na norma EN 1015-11 (CEN, 1999a), com metade de cada provete resultante do ensaio anterior.

Este ensaio contemplou o procedimento que se descreve de seguida. Preparou-se a máquina universal Zwick/Rowell (Figura 7.10a), com a introdução da célula de carga de 50 kN no dispositivo para compressão de prismas com 40mm de secção (Figura 7.10c). Colocou-se um provete entre os dispositivos preparados, com a face rugosa disposta lateralmente para permitir que a carga atuasse numa superfície lisa, sem irregularidades. Deu-se início ao carregamento através do mesmo software anterior, a uma velocidade de 0,7 mm/min. Ficam registados os valores da força aplicada em função do tempo, bem como a força máxima de compressão (F_c) que ocorre antes da rotura.

A resistência à compressão R_c [MPa] é obtida dividindo pela secção de aplicação da carga [mm²], a força máxima F_c [N] obtida pelo software do equipamento.

7.1.2.5 Porosidade aberta e massa volúmica aparente

Os dados obtidos para o ensaio da porosidade aberta e da massa volúmica aparente são os mesmos. Utilizaram-se os topos (íntegros) dos meios provetes resultantes do ensaio de resistência à compressão. Este ensaio teve como base a norma NP EN 1936 (IPQ, 2008) para pedra natural; no entanto foram efetuadas as devidas alterações para a aplicação aos provetes em estudo. Aplicou-se tecido de nylon a envolver as amostras para evitar perdas de material.

O procedimento de ensaio foi o que se descreve a seguir. Após o ensaio de compressão, os topos dos provetes foram colocados na estufa a uma temperatura de 60°C durante 48h. Limpam-se bem as amostras para eliminar o material solto à superfície e de seguida envolveu-se cada amostra em tecido de nylon justo, fechou-se com o fio de pesca e pesou-se numa balança de precisão 0,001g. Introduziram-se os provetes no exsiccador com sistema de vácuo (ligando através de tubagem a introdução de água, recipiente dessecador e bomba de vácuo), isolou-se a entrada de ar e ligou-se a bomba de vácuo de modo a reduzir a pressão no interior do equipamento, permanecendo assim 24h (Figura

7.11). Passadas as 24h, introduziu-se água, de forma lenta durante mais de 15 minutos, até os provetes se encontrarem completamente submersos, permanecendo assim mais 24h. Passadas 24h desligou-se a bomba de vácuo e os provetes permaneceram outras 24h submersos. Finalmente retiraram-se os provetes do exsicador e procedeu-se às diferentes pesagens. Retirou-se cada provete, um a um, do exsicador e procedeu-se à pesagem em imersão, através de um suporte localizado por baixo da balança. Esta pesagem correspondeu à pesagem hidrostática (m_2) (Figura 7.12) e foi realizada a apenas 3 provetes seguidos para evitar a perda de água. Seguidamente à pesagem hidrostática colocaram-se os provetes sobre um pano húmido para retirar o excesso de água envolvente e pesaram-se os provetes, também apenas 3 seguidos. Esta pesagem resulta na massa saturada dos provetes (m_3). Repetiram-se os passos anteriores até à finalização das pesagens de todos os provetes.



Figura 7.11 – Ensaio de porosidade aberta e massa volúmica aparente. a) Equipamento; b) Provetes submersos; c) Disposição dos provetes

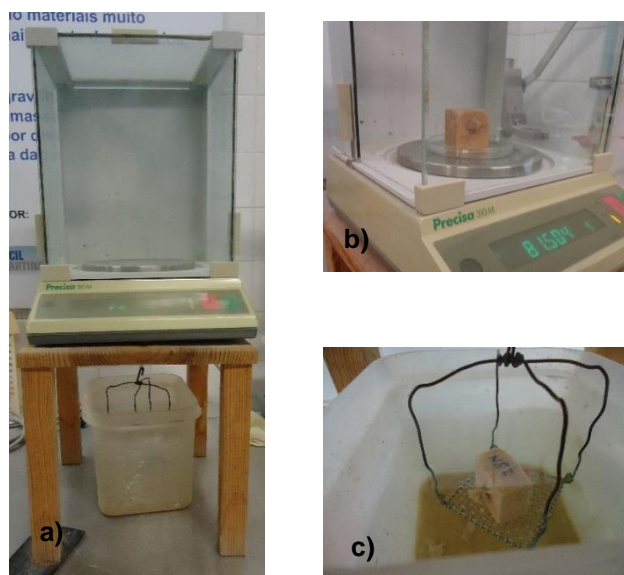


Figura 7.12 – a) Balança de pesagem corrente e pesagem hidrostática; b) Pesagem dos provetes saturados; c) Pesagem hidrostática

Os valores obtidos para as diferentes massas permitem calcular a massa volúmica aparente e a porosidade aberta.

A massa volúmica aparente é dada pela equação 7.4:

$$MVa = \frac{m}{V} = \frac{m_1}{m_3 - m_2} \times 10^3 \text{ [kg/m}^3\text{]} \quad (7.4)$$

onde:

m – massa do provete [g];

V – volume total do provete [m³];

m₁ – massa seca do provete [g];

m₂ – massa hidrostática do provete [g];

m₃ – massa saturada do provete [g].

A porosidade aberta é dada pela equação 7.5:

$$Pab = \frac{v}{V} = \frac{m_3 - m_1}{m_3 - m_2} \times 100 \text{ [%]} \quad (7.5)$$

onde:

v – volume de vazios do provete [m³].

Determinados os valores para todos os provetes, calculou-se a média e o desvio-padrão das 3 amostras de cada uma das argamassas.

7.1.2.6 Absorção de água por capilaridade

Este ensaio foi realizado com base nas normas EN 1015-18 (CEN, 2002) e EN 15801 (CEN, 2009), com alguns ajustes. A finalidade do ensaio foi determinar o coeficiente de capilaridade (CC), correspondente à velocidade de absorção inicial que determina em parte a suscetibilidade à deterioração e influencia a durabilidade da argamassa e a proteção dos suportes; e o valor assintótico (VA), que corresponde ao valor máximo de água absorvida. Quanto maior o valor assintótico, maior a quantidade de poros da gama capilar. O ensaio foi realizado na sala condicionada à temperatura de 20 ± 2°C e humidade relativa de 65 ± 5%.

Antes da realização do ensaio os provetes foram colocados na estufa a 60°C durante pelo menos 48h, até atingirem condições de massa constante.

Este ensaio dividiu-se entre a preparação dos provetes e depois a preparação das caixas e realização do ensaio propriamente dito.

A preparação dos provetes contemplou os seguintes passos. Retiraram-se os provetes da estufa e esperou-se que estes arrefecessem, em ambiente de baixa humidade relativa, para serem manuseados. Pesaram-se os provetes na balança de precisão 0,001g. Envolveu-se cada um dos provetes em película aderente de polietileno para garantir que a absorção se efetuasse apenas pela base e fosse unidirecional, evitando as perdas pelas áreas laterais dos provetes. Na base colocou-se a gaze presa por um elástico, para evitar perdas de material visto que as argamassas em estudo se mostraram um pouco friáveis – a gaze deve permitir a passagem da água, sem influenciar o normal fluxo de água

absorvida pelo provete, mas também deve garantir que retém eventual material que se desagregue da base. Pesaram-se novamente os provetes, agora como conjunto provete + película + gaze + elástico (Figura 7.13).

A preparação prévia das caixas e a realização do ensaio seguiram o procedimento que se descreve em seguida. Colocou-se água no fundo das caixas plásticas para garantir um ambiente saturado húmido e vedaram-se. Dentro das caixas colocou-se um tabuleiro de base rígida nivelado e sobrelevado em relação à água (apoiado sobre tijolos). Colocou-se uma rede plástica dentro do tabuleiro para sobrelevar os provetes mas permitir o contacto praticamente total da base do provete com a água. Adicionou-se água ao interior do tabuleiro até perfazer uma lâmina de água de 5 mm de altura, medida com a régua – esta altura de água foi retificada e mantida ao longo do ensaio, principalmente durante a fase inicial de elevada absorção de água. Pesou-se cada provete no instante inicial e colocou-se, por ordem, dentro do tabuleiro; de seguida mediu-se a massa aos 5, 10, 15, 30 e 60 minutos e depois de hora a hora até a curva de absorção se encontrar num patamar de estabilização; o cuidado de deixar pingar a água em excesso absorvida pela gaze em cada provete é importante para não se proporcionarem erros nas medições das massas nem correr o risco de pingar sobre outros provetes (Figura 7.13).

Os valores das massas foram colocados de imediato no gráfico para observar o andamento da curva onde, no caso das argamassas em estudo, a estabilização se iniciou ao fim de 1h; no entanto efetuou-se leituras até às 5h e posteriormente, uma vez por dia até às 96h.

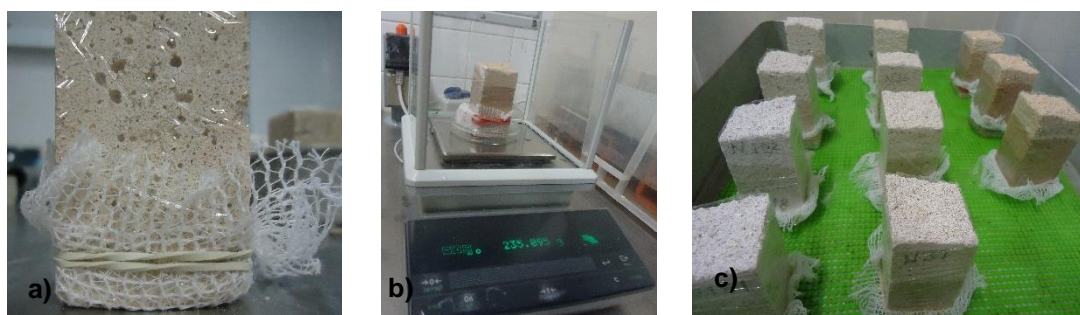


Figura 7.13 – Ensaio de capilaridade. a) Provete com película aderente, gaze e elástico; b) Pesagem dos provetes durante o ensaio; c) Disposição dos provetes

A curva de absorção de água por capilaridade foi obtida através do gráfico que relaciona a quantidade de água absorvida por área da base [kg/m^2] com a raiz quadrada do tempo [$\text{min}^{1/2}$]. A quantidade de água absorvida M é dada pela equação 7.6.

$$M = \frac{m_i - m_0}{S} \text{ [kg/m}^2\text{]} \quad (7.6)$$

onde,

m_i – massa do provete no instante i [kg];

m_0 – massa do provete no instante inicial [kg];

S – secção do provete em contacto com a água [0,04x0,04m²]

O coeficiente de capilaridade (CC) pode ser obtido efetuando uma regressão linear dos pontos iniciais da curva, através da determinação do declive (m) da reta inicial formada por estes pontos: $y = mx + b$. Pode também efetuar-se o método simplificado através da análise individual do gráfico correspondente a cada argamassa, e a escolha dos pontos que formam a reta “mais apropriada” à determinação do coeficiente. Neste ensaio foi utilizado o método simplificado através da equação 7.7.

$$CC = \frac{M_i - M_0}{\sqrt{t_i - t_0}} \text{ [kg/(m}^2 \cdot \text{min}^{1/2}\text{)]} \quad (7.7)$$

onde,

M_i – quantidade de água absorvida até ao instante t_i [kg/m²];

M₀ – quantidade de água absorvida até ao instante t₀ [kg/m²];

t_i – instante i [min];

t₀ – instante inicial [min].

O valor assintótico (VA) determinou-se observando a máxima quantidade de água absorvida no final do ensaio e é expresso em [kg/m²].

7.1.2.7 Secagem

A secagem foi realizada com base no Test No. II.5 “Evaporation curve” da RILEM (1980a) e em Brito *et al.* (2011). Decorreu na mesma sala condicionada onde se efetuou o ensaio da absorção de água por capilaridade (temperatura de 20 ± 2°C e humidade relativa de 65 ± 5%), e iniciou-se após a finalização deste ensaio.

A última pesagem do ensaio de capilaridade corresponde à pesagem no instante 0 minutos do ensaio de secagem.

O procedimento descreve-se em seguida. Os provetes foram retirados da caixa em que se encontravam a realizar o ensaio anterior, foram pesados e colocados na bancada metálica lisa ao lado da balança – tal como anteriormente referido, a película aderente permite a evaporação de água apenas pelo topo do provete e a gaze impede a perda de material; (Figura 7.14). No primeiro dia pesaram-se os provetes de hora a hora durante 7 horas; no dia seguinte realizaram-se 3 pesagens e posteriormente as pesagens foram efetuadas de 24 em 24 horas até à estabilização da massa (520 horas). Durante o decorrer do ensaio efetuou-se a curva de secagem de cada um dos provetes, de modo a acompanhar a evaporação ao longo do tempo.



Figura 7.14 – Provetes durante o ensaio de secagem

A curva da secagem foi descrita pelo gráfico que relaciona o teor de água [%] em função do tempo [h]. O teor em água (W_t) foi obtido através da equação 7.8.

$$W_t = \frac{m_i - m_0}{m_0} \times 100 \text{ [%]} \quad (7.8)$$

onde,

m_i – massa do provete no instante i [kg];

m_0 – massa do provete seco [kg].

O ensaio terminou ao fim de 520h, quando já não houve variação significativa de massa e o teor de água estava na ordem dos 0,80%.

A taxa de secagem (TS) corresponde ao declive do troço inicial da curva de secagem (em kg/m^2) em função do tempo, que no caso das argamassas em estudo correspondeu às primeiras 24h do ensaio. Esta taxa refere-se ao “*Stage I*” onde a fase líquida é contínua na rede dos poros (Brito *et al.*, 2011) e é obtida diretamente através das curvas de cada argamassa.

O índice de secagem (IS) é um parâmetro qualitativo que se calcula através de uma equação trabalhada por Brito *et al.* (2011) e Faria *et al.* (2012b), com base numa norma italiana. A equação 7.9 aproxima o cálculo do integral à soma sucessiva de trapézios.

$$IS = \frac{\sum_{i=1}^{i=n} [(t_i - t_{i-1}) \times \frac{W_{i-1} + W_i}{2}]}{W_{\text{máx}} \times t_f} \text{ [-]} \quad (7.9)$$

onde,

t_i – tempo de ensaio [h];

t_f – tempo final de ensaio [h];

W_i – quantidade de água no provete no instante i , em relação à massa seca [%];

$W_{\text{máx}}$ – quantidade de água inicial, em relação à massa seca [%].

Tanto as taxas de secagem como os índices de secagem resultam da média dos ensaios a 3 amostras de cada argamassa.

7.1.2.8 Porosimetria de mercúrio

Por forma a complementar o ensaio da porosidade aberta através da caracterização dos poros das argamassas e para comparação com os resultados do mesmo ensaio às amostras de argamassas aplicadas sobre o tijolo e sobre o murete de taipa, fez-se o ensaio da porosimetria. As amostras utilizadas correspondem a fragmentos de uma das partes dos provetes, resultantes do ensaio de resistência à compressão que foram posteriormente colocadas na estufa a 60°C e posteriormente foram colocados em sacos de plástico, selados e identificados, onde se mantiveram até à realização do ensaio. Procedeu-se ao desgaste do material até a amostra ter as dimensões necessárias para ser colocada no penetrómetro (Figura 7.15a). Antes do ensaio foram colocadas em estufa ventilada, a 40°C, dentro de caixas de petri (Figura 7.15b).

O equipamento, procedimento e resultados foram descritos no ponto 7.1.1.5.



Figura 7.15 – Preparação das amostras para o ensaio de porosimetria de mercúrio

7.1.2.9 Resistência aos sulfatos

O ensaio de resistência aos sulfatos foi realizado com base na norma NP EN 12370 (IPQ, 2001) para pedras naturais. O procedimento descrito por esta norma é demasiado destrutivo para argamassas de cal e como tal utilizou-se uma solução de imersão de 3,09% do sulfato de sódio anidro, Na_2SO_4 , (metade do valor definido pela norma) (Faria, 2004). Os provetes utilizados são os mesmos que foram utilizados nos ensaios de capilaridade e secagem. Antes do ensaio foram colocados em estufa ventilada a 105°C durante 24h.

O procedimento deste ensaio descreve-se em seguida. Preparou-se uma solução de 3,09% de sulfato de sódio anidro diluindo 329g de Na_2SO_4 por cada 10 litros de água potável e colocou-se no recipiente plástico com tampa e com a respetiva rede no fundo para permitir a absorção pela base dos provetes. Após a secagem dos provetes em estufa, estes foram arrefecidos durante 35-40 minutos para evitar o choque térmico e foram pesados, obtendo-se as massas iniciais. Os provetes foram completamente imersos na solução, afastados uns dos outros e das paredes do recipiente, durante duas horas (Figura 7.16). Retiraram-se da solução e colocaram-se de novo na estufa a 105°C durante 24 horas. Passadas as 24 horas retiraram-se os provetes da estufa, deixaram-se arrefecer durante 35-40 minutos e pesaram-se de novo, individualmente. O ciclo imersão/secagem foi repetido durante 20 dias úteis, correspondentes a 20 ciclos; sempre que necessário acrescentou-se solução, nas mesmas quantidades definidas, para cobrir completamente os provetes. O ensaio terminou no 25º ciclo.



Figura 7.16 – Ensaio de resistência aos sulfatos

Os resultados são interpretados através da variação da massa ao longo dos ciclos decorridos, dada pela equação 7.10.

$$\Delta m = \frac{m_i - m_0}{m_0} (\%) \quad (7.10)$$

onde,

m_i – massa do provete no ciclo i [g];

m_0 – massa inicial do provete [g]

7.1.3. Provetes em suporte de taipa (90 dias)

7.1.3.1 Dureza superficial por durómetro Shore A

A dureza superficial foi medida como descrito no ponto 7.1.1.1, num total de 6 pontos por painel (por argamassa).

Os resultados obtêm-se da média dos 6 pontos medidos.

7.1.3.2 Resistência superficial por esclerómetro pendular

Este ensaio foi descrito no ponto 5.1.1. Foram, neste caso, ensaiados 3 pontos em cada painel, correspondente a cada argamassa aplicada.

Os resultados obtêm-se através da média dos valores para cada argamassa.



Figura 7.17 – Ensaio de resistência superficial do reboco aplicado ao murete (90 dias)

7.1.3.3 Velocidade de propagação dos ultrassons

O ensaio da velocidade de propagação dos ultrassons foi realizado com o mesmo equipamento abordado no ponto 7.1.1.3.

Neste caso, a escolha dos pontos e da localização das medições foi diferente. Marcaram-se 4 pontos (A, B, C e D) distanciados de 5 cm, em 4 zonas de cada painel. As medições efetuaram-se entre os pontos AB, AC e AD.

Os resultados foram obtidos através da média dos valores obtidos para cada painel.



Figura 7.18 – Pontos de ensaio da velocidade de propagação dos ultrassons do reboco aplicado ao murete, aos 90 dias

7.1.3.4 Absorção de água sob baixa pressão por tubos de Karsten

A absorção de água sob baixa pressão foi realizada como descrito no ponto 5.1.3. Colocaram-se 4 tubos no nível superior e 4 tubos no nível intermédio, ou seja, 2 tubos por painel. Este ensaio decorreu durante 1h e foram medidas as quantidades de água absorvidas aos 5, 10, 15, 30 e 60 minutos.



Figura 7.19 – Ensaio de absorção de água sob baixa pressão – tubos de Karsten, do reboco aplicado ao murete, aos 90 dias

7.1.3.5 Porosimetria de mercúrio

Este ensaio foi realizado como descrito no ponto 7.1.1.5. Neste caso foram retiradas duas amostras de cada argamassa, referentes à zona mais seca (topo do murete) e à zona mais húmida (base do murete).

8. APRESENTAÇÃO E ANÁLISE DOS RESULTADOS

8.1. Características dos suportes

8.1.1. Murete de taipa

O murete está dividido em quatro painéis verticais (onde foram posteriormente aplicadas as argamassas) e pode dividir-se em três níveis (superior, intermédio e inferior). Os quadros que se seguem estão divididos por colunas que correspondem aos painéis do murete. Ou seja, cada coluna contém os valores de um painel. A leitura é feita de cima para baixo e da esquerda para a direita.

8.1.1.1 Resistência superficial por esclerómetro pendular

A resistência média superficial do murete de taipa e o desvio-padrão foi de $86,83 \pm 5,76$ graus Vickers. Os valores médios aumentam da esquerda para a direita; justifica-se esta situação pelo facto da parte esquerda do murete se encontrar mais molhada do que a parte à direita. Os pontos ensaiados encontram-se esquematizados na Figura 8.1. O material é frágil e mostrou-se friável quando se efetuou este ensaio (Figura 8.2). Verifica-se nesta figura que se soltou material durante o ensaio e são facilmente detetáveis os locais de aplicação do equipamento.

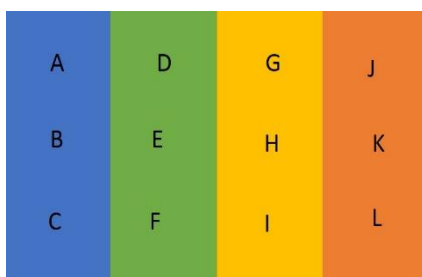


Figura 8.1 – Ensaio de resistência superficial – esquema de pontos ensaiados no murete de taipa

Quadro 8.1 – Resistência superficial do murete de taipa não rebocado

Pontos	DS _E (graus Vickers VH)	Pontos	DS _E (graus Vickers VH)	Pontos	DS _E (graus Vickers VH)	Pontos	DS _E (graus Vickers VH)
A	78	D	83	G	86	J	92
B	91	E	87	H	90	K	101
C	82	F	85	I	83	L	84



Figura 8.2 – Aspeto depois do ensaio

8.1.1.2 Condutibilidade térmica

A condutibilidade térmica do murete de taipa e o desvio-padrão registou valores de $1,24 \pm 0,35$ W/m.K. Apresentou uma condutibilidade térmica dentro da gama espetável; no entanto superior ao valor de $1,10$ W/m.°C tabelado no ITE 50 do LNEC, para adobe, taipa e blocos de terra comprimidos (Pina dos Santos & Matias, 2006). Tal situação pode ter justificação no grau elevado de humidade que o murete apresentava. Os pontos com valores mais elevados podem ser justificados com zonas no interior do murete mais compactadas. O esquema de pontos ensaiados encontra-se na Figura 8.3.



Figura 8.3 - Ensaio de condutibilidade térmica – esquema de pontos ensaiados no murete de taipa

Quadro 8.2 – Condutibilidade térmica do murete de taipa

Pontos	λ [W/m.K]	Pontos	λ [W/m.K]	Pontos	λ [W/m.K]	Pontos	λ [W/m.K]
A	1,680	E	0,953	I	1,040	M	1,090
B	1,770	F	1,110	J	1,300	N	1,040
C	1,210	G	1,160	K	0,834	O	1,000
D	0,936	H	1,020	L	1,680	P	2,060

8.1.1.3 Absorção de água sob baixa pressão por tubos de Karsten

Não foi realizado o ensaio no nível inferior por se encontrar demasiado molhado, o que impossibilitou a colocação dos tubos. O nível intermédio encontra-se mais exposto que o nível superior, onde existe um capeamento, e é neste nível que se nota uma absorção mais rápida. A média e respetivo desvio-padrão dos coeficientes de absorção de 4 ml de água são de $8,25 \pm 3,95$ kg/(m².min^{1/2}) para o nível superior e $6,13 \pm 2,21$ kg/(m².min^{1/2}) para o nível intermédio. Por sua vez, a zona à direita encontra-se menos exposta à chuva que a zona à esquerda. No entanto, notou-se uma absorção de água dos primeiros 4 ml de água muito mais lenta no quarto painel. A média dos coeficientes de absorção de 4 ml de água é de $8,18$ kg/(m².min^{1/2}) para o painel 1, $9,71$ kg/(m².min^{1/2}) para o painel 2, $7,36$ kg/(m².min^{1/2}) para o painel 3 e $3,50$ kg/(m².min^{1/2}) para o painel 4. Esta situação pode dever-se, em parte, à maior fissuração e degradação das zonas de colocação dos tubos 1 e 2. (Figura 8.4). A quantidade de água absorvida por cada tubo observa-se na Figura 8.5.

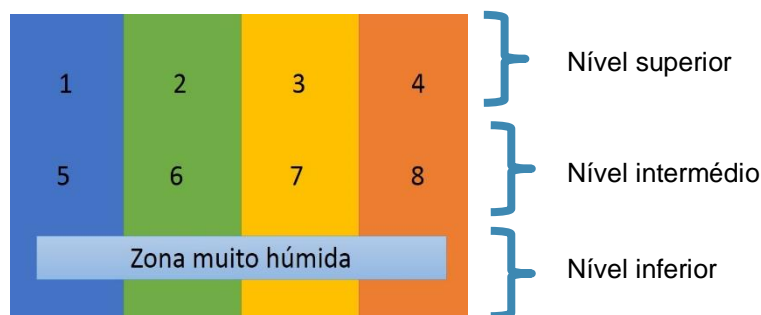


Figura 8.4 - Ensaio de absorção de água sob baixa pressão – esquema de pontos ensaiados no murete de taipa

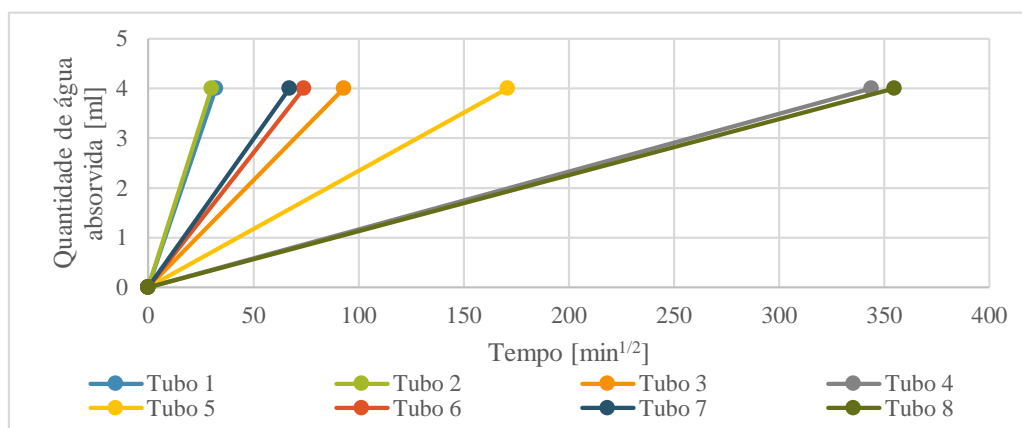


Figura 8.5 – Resultados dos tubos de Karsten no murete de taipa

8.1.2. Tijolo de 7 cm

8.1.2.1 Condutibilidade térmica

A condutibilidade térmica do tijolo (λ), resultante da média dos 6 valores obtidos, foi de $0,596 \pm 0,083$ [W/m.K]. Este valor encontra-se entre os valores tabelados para material cerâmico no ITE 50 do LNEC (Pina dos Santos & Matias, 2006) que estão na gama dos 0,34 a 1,04 W/m.K. No entanto, a especificação do equipamento define uma espessura mínima homogénea de material de 2 cm e o septo de tijolo não apresenta essa espessura (apenas 1,5 mm), pelos que os resultados devem ser considerados com muitas reservas.

A condutibilidade térmica do tijolo é inferior à do murete de taipa, no entanto a comparação não é totalmente correcta já que o murete se encontrava muito húmido enquanto que o tijolo esteve sempre num ambiente controlado, além de que o ensaio ao tijolo foi realizado como se este fosse um elemento homogéneo.

8.1.2.2 Absorção de água sob baixa pressão por tubos de Karsten

O coeficiente de absorção total do tijolo obtido foi em média e desvio-padrão de $0,70 \pm 0,07$ kg/(m².min¹/²). Não foi possível determinar o coeficiente de absorção inicial pois o tijolo não chegou a absorver 4 ml de água em nenhum dos 3 tubos durante o ensaio (60 minutos). Com os resultados

de cal aérea e terra

A influência da terra como ligante

obtidos entende-se que, em comparação com o suporte de taipa, o tijolo influenciou de maneira diferente a retenção de água da argamassa no estado fresco. Os suportes absorvem água pelos poros mais pequenos do que os que se encontram na própria argamassa. Como tal, não é de direta compreensão que a taipa absorva maior quantidade de água do que o tijolo. O resultado de absorção de água sob baixa pressão mostra que a influência deste suporte de tijolo na absorção de água da argamassa no estado fresco será particularmente diferente da ocorrida na argamassa aplicada sobre o murete.

8.2. Características dos constituintes das argamassas e composições das argamassas

O valor da baridade da terra argilosa tal como foi utilizada nas argamassas ($1,090 \text{ kg/dm}^3$) encontra-se entre os correspondentes valores das areias e da cal. Com base nos valores da baridade foi possível determinar a quantidade, em massa, de cada constituinte de cal aérea e areias a utilizar em cada argamassa, e daí a correspondente quantidade mássica de terra. A baridade de todos os constituintes apresenta-se no Quadro 8.3.

Quadro 8.3 – Baridades dos constituintes

Material	Baridade (kg/dm^3)
APAS12	1,412
APAS20	1,405
APAS30	1,388
Mistura das areias	1,463
CL	0,362
Terra argilosa	1,090

Assim obtiveram-se as composições das argamassas, que se traduzem nos traços ponderais de cada argamassa utilizada (Quadro 8.4). Verifica-se que, partindo de um traço base volumétrico de 1:2, a que corresponde um traço em massa de 1:7,7, apesar da massa de cal ser mais reduzida e a massa de terra ir crescendo, a soma dos materiais é a mesma, não se alterando o traço.

Quadro 8.4 – Traço ponderal das argamassas; Relações água/ligante, água/terra e água/cal aérea

Argamassas	CL:Terra:Areias	CL+Terra:Areias	Relação a/l [-]	Relação a/t [-]	Relação a/CL [-]
CL2	1:0:7,7	1:7,7	1,7	-	1,7
CL2_5t(L)	1:0,1:8,1	1:7,7	1,8	35,4	1,9
CL2_10t(L)	1:0,1:8,6	1:7,7	1,8	17,7	2,0
CL2_25t(L)	1:0,3:10,3	1:7,7	1,8	7,1	2,4
CL2_50t(L)	1:1:15,5	1:7,7	1,8	3,5	3,5

As relações água/ligante (considerando o ligante constituído pela cal e terra), água/terra, e água/cal aérea apresentam-se no Quadro 8.4.

Enquanto a relação água/ligante se mantém, a relação água/terra diminui e a relação água/cal aérea aumenta com o aumento da substituição parcial de cal aérea por terra.

As curvas granulométricas obtidas para a terra (por via seca e por via húmida) apresentam-se na Figura 8.6. Na Figura 8.7 a curva por via seca encontra-se sobreposta às areias utilizadas para comparação das dimensões.

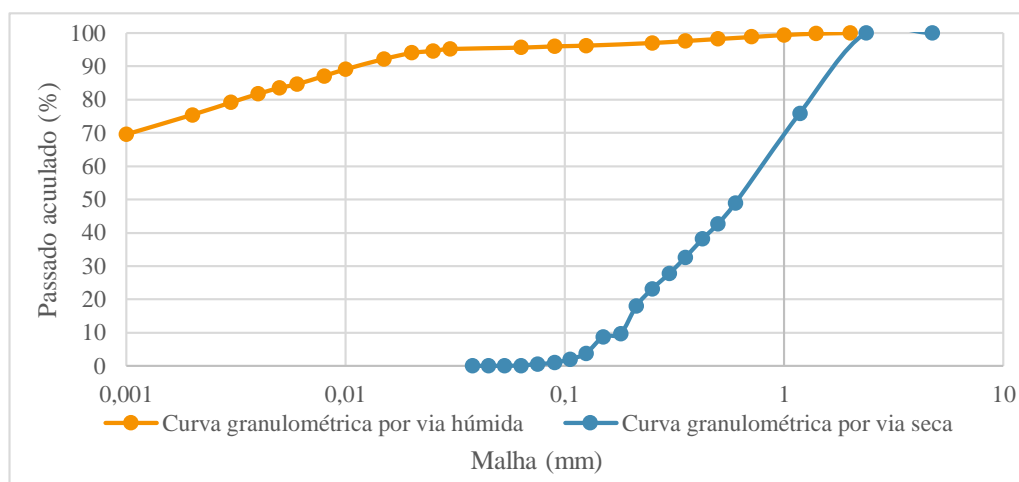


Figura 8.6 – Curvas granulométricas da terra, a seco e a húmido

Embora a terra seca apresente distribuição comparável à das areias, a análise granulométrica por via seca não mostra a constituição real da terra. Apesar da agitação dos peneiros, há sempre grãos maiores que não se desfazem por completo a seco, e só durante a mistura com água é que se separam em grãos mais finos. De acordo com os resultados obtidos, observou-se uma granulometria contínua. Através da observação da curva verifica-se que a maior parte do material é constituído por areia fina, siltes e argilas, contendo também alguma areia média e grossa. Comparando a curva a seco com a curva a húmido observa-se a grande diferença: a curva a húmido mostra uma constituição maioritariamente argilosa e siltosa, principalmente argilosa que através da granulometria a seco é muito difícil de aferir. A análise granulométrica por difração laser realizada à cal aérea por Faria (2004), mostra que este material contém partículas muito mais finas do que a terra (até 0,01 mm). Como tal, pode considerar-se que a substituição de cal por terra implica uma alteração na granulometria do ligante, cada vez com material de granulometria mais aproximada à granulometria da terra argilosa.

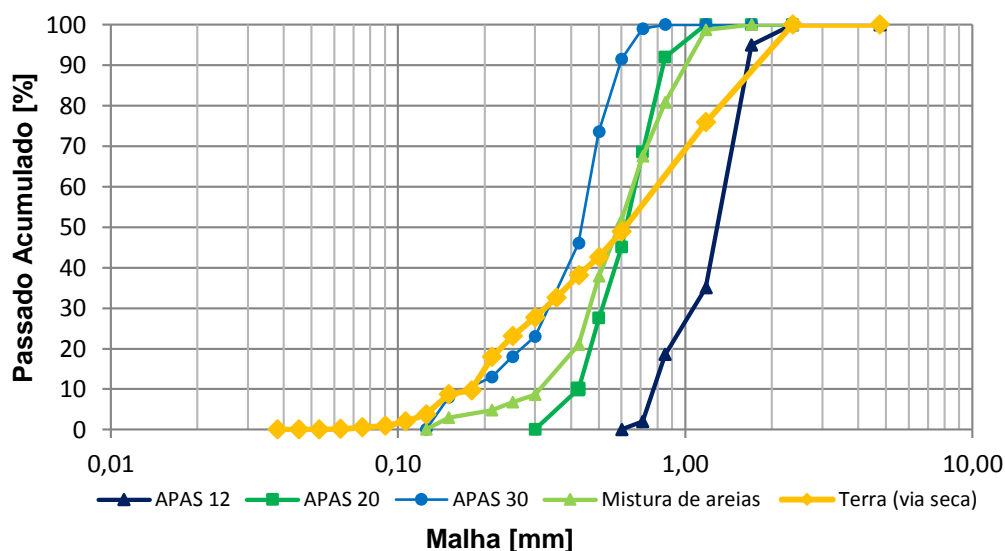


Figura 8.7 – Curvas granulométricas (APAS12, APAS20, APAS30, Mistura de areias, Terra)

8.3. Características das argamassas

8.3.1. Características no estado fresco

Os resultados obtidos para as argamassas no estado fresco advêm da média dos valores obtidos nas duas etapas de amassaduras, que se efetuaram com um intervalo de duas semanas, mas onde se mantiveram os mesmos constituintes e proporções. Apesar dos constituintes não se alterarem, observar os resultados de todos os ensaios individualmente permite detetar possíveis interferências relativas a alguns fatores: diferentes operadores que realizaram os mesmos ensaios, medições e pesagens, as condições de temperatura e humidade relativa que se vão alterando ao longo do dia e nos diferentes dias de execução das argamassas, utilização de diferente saco de cal aérea, embora do mesmo lote.

Todos os valores são apresentados graficamente para cada ensaio e são apresentados globalmente no Quadro 9.1.

8.3.1.1 Consistência por espalhamento

A Figura 8.8 mostra os resultados do ensaio de espalhamento da argamassa fresca. São apresentados os resultados médios de cada uma das etapas de amassaduras (amassaduras 1 e 2; amassaduras 3 e 4) e o espalhamento médio de todas as amassaduras de uma mesma argamassa, com o respetivo desvio-padrão. Todas as determinações foram realizadas pelo mesmo operador para minimizar esse fator de desvio entre os valores obtidos. Os valores obtidos no ensaio encontram-se no Quadro 9.1 e no Anexo A.1.

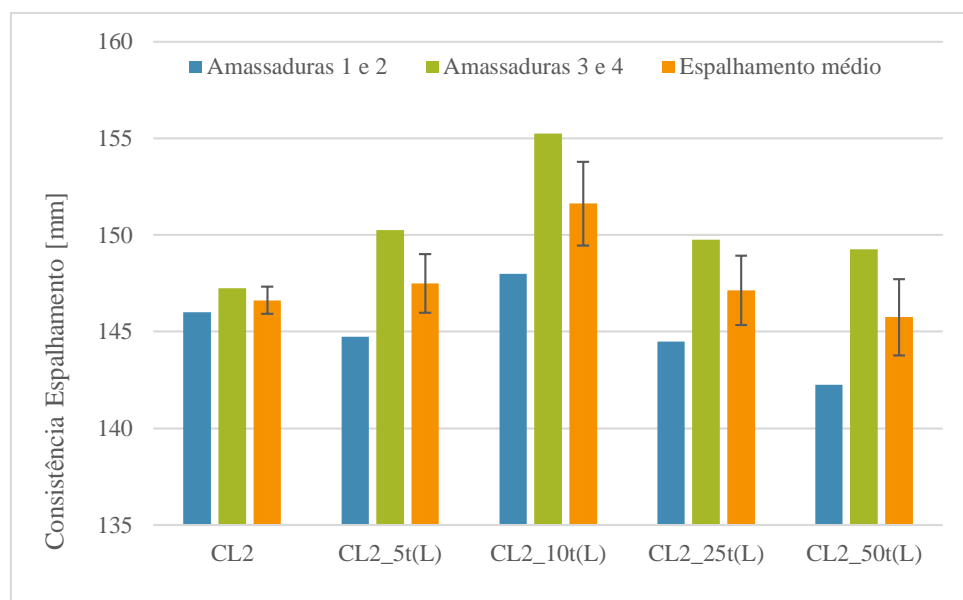


Figura 8.8 – Resultados da consistência por espalhamento das argamassas no estado fresco

O espalhamento médio e desvio-padrão obtido para todas as argamassas analisadas foi de 148 ± 4 mm. Verifica-se que se encontra dentro da gama de valores 150 ± 10 mm, definida inicialmente como a procurada para este tipo de argamassas. Segundo a norma EN 1015-3 (CEN, 1999), para a massa volúmica obtida, deveria ter-se uma gama superior (175 ± 10 mm), mas isto para argamassas com base em cimento; no caso de argamassas com base em cal e particularmente no caso das argamassas em análise, a trabalhabilidade é adequada mesmo com este espalhamento mais reduzido; tornar-se-iam difíceis de aplicar e apresentariam comportamentos ineficientes (por exemplo em termos de retração (Faria *et al.*, 2008) com quantidades de água superiores. Para além disso, a mesa de espalhamento utilizada não está conforme a última versão da norma, o que também não justifica o seu cumprimento estrito.

Assim foi adicionada a quantidade de água considerada necessária para obter uma boa trabalhabilidade. Apesar da quantidade de água ter aumentado de 1000 ml para 1025 ml da argamassa padrão para as argamassas com terra, o espalhamento médio não se alterou significativamente. No entanto verifica-se um aumento do valor médio do espalhamento entre as argamassas CL2_5t(L) e CL2_10t(L). Foi possível observar-se uma redução deste parâmetro para as percentagens de 25% e 50% de terra. Ou seja, para percentagens mais elevadas de terra adicionada, há uma redução da consistência por espalhamento.

De acordo com a sensibilidade do operador que realizou todas as determinações deste ensaio, a argamassa que confere melhores características de trabalhabilidade trata-se da CL2_25t(L).

8.3.1.2 Massa volúmica

Os resultados da massa volúmica no estado fresco encontram-se na Figura 8.9. São apresentados os valores da primeira e segunda etapas de amassadura (uma determinação em cada etapa) e

A influência da terra como ligante

a massa volúmica média de cada argamassa. Este ensaio foi realizado por dois operadores diferentes. Os valores obtidos no ensaio encontram-se no Quadro 9.1 e no Anexo A.2.

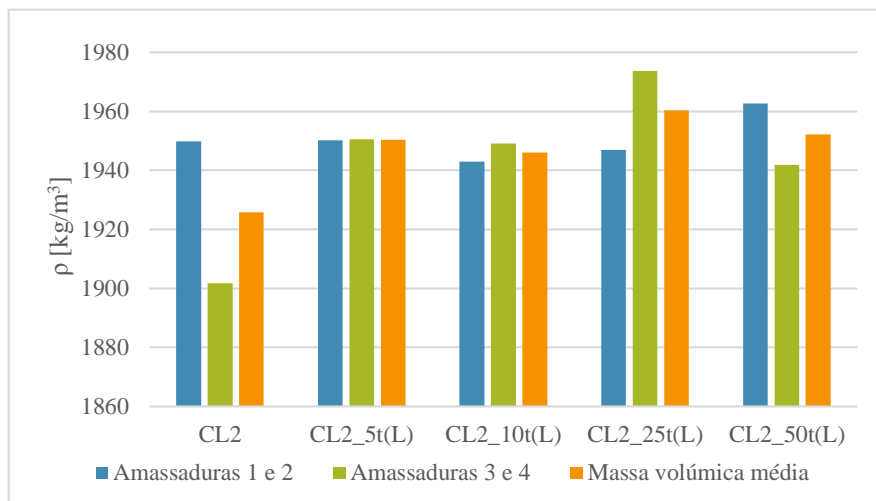


Figura 8.9 – Resultados da massa volúmica das argamassas no estado fresco

A massa volúmica de todas as argamassas apresenta como valor médio e desvio-padrão $1947 \pm 18 \text{ kg/m}^3$. Pode observar-se um valor médio inferior na argamassa padrão (CL2), sendo que para as restantes argamassas não há uma variação significativa dos valores de massa volúmica. Considerando que, como esperado, não há diferenças entre a primeira amassadura e a repetição, pode indiciar-se a probabilidade de ter ocorrido um problema na execução deste ensaio durante a repetição da argamassa CL2, dada a discrepância de valores.

8.3.1.3 Teor de ar

Os resultados do ensaio de teor em ar apresentam-se na Figura 8.10 e correspondem ao ensaio realizado na 1ª e 2ª etapas de amassaduras e ao valor médio entre ambas as determinações para cada argamassa. Os valores obtidos no ensaio encontram-se no Quadro 9.1 e no Anexo A.3.

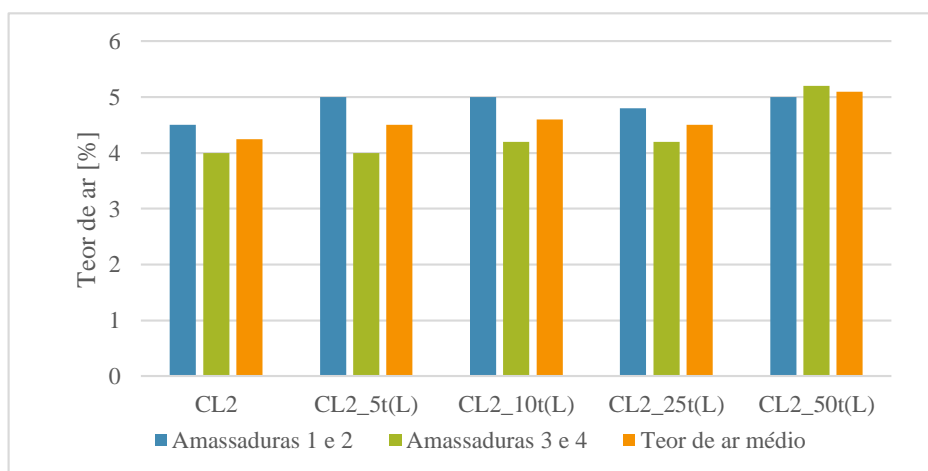


Figura 8.10 – Resultados do teor de ar das argamassas no estado fresco

O teor de ar aumentou sempre ligeiramente com a utilização de terra, em relação à argamassa padrão. No entanto, e de um modo geral, esteve sempre entre 4% e 5% (valor médio e desvio-padrão de todas as argamassas de $4,6 \pm 0,4$ %), o que significa que a substituição de cal aérea por uma percentagem de terra até 50% não aparenta ter influência significativa no teor de ar das argamassas no estado fresco.

8.3.1.4 Retenção de água

A percentagem de água retida nas argamassas no estado fresco observa-se na Figura 8.11 relativamente às duas etapas de amassadura e em termos médios de cada argamassa. Os valores obtidos no ensaio encontram-se no Quadro 9.1 e no Anexo A.4.

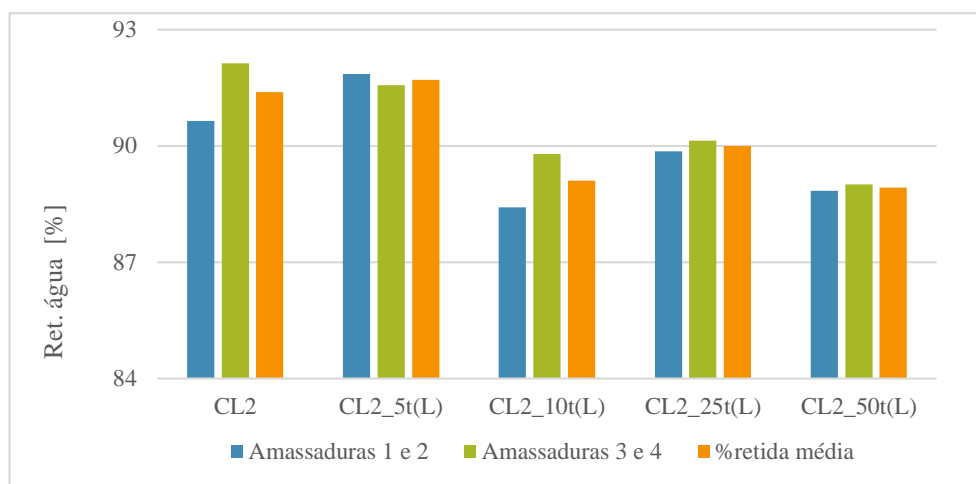


Figura 8.11 – Resultados da retenção de água das argamassas no estado fresco

A retenção de água média e desvio-padrão do conjunto de argamassas foi de 90 ± 1 % variando entre os 88% e os 92%. Verificou-se um ligeiro aumento da retenção de água da argamassa CL2_5t(L) em relação à argamassa padrão, enquanto que houve uma redução mais drástica deste parâmetro quando se adicionaram maiores quantidades de terra. Entre as percentagens de 10% e 25% não é possível saber se por exemplo 15 ou 20% de terra reduziram mais a retenção de água ou se a aumentavam. Do mesmo modo, entre 25% e 50% não é possível saber a partir de que quantidade de terra a retenção de água volta a diminuir. Existe a possibilidade de argamassas com menor retenção de água (por exemplo a CL2_50t(L)) terem assim maior propensão para a retração inicial, por libertarem a água no estado fresco mais depressa e enquanto ainda não estão suficientemente endurecidas. A diminuição da retenção de água da argamassa no estado fresco pode, assim, implicar maiores retrações durante a cura. Uma cura controlada, nomeadamente através da molhagem prévia do suporte e de aspersão de água nos primeiros dias de cura, será nestes casos ainda mais fundamental para controlar a retenção de água e diminuir a retração inicial. O ensaio teve a duração de 10 minutos e não de 5 minutos como especifica a norma europeia prEN 1015-8 (CEN, 1999b) e, como tal, pode ter-se chegado muito próximo do valor de saturação do papel de filtro e obter resultados um pouco diferentes dos que se obteriam durante os 5 minutos.

8.3.1.5 Conclusões preliminares – avaliação da aplicabilidade e da retração de secagem inicial

As argamassas com terra apresentavam colorações que se distinguiam da argamassa só de cal, mais clara e quase branca. A terra incorporada funciona assim como um pigmento natural, que confere características às argamassas que podem ser valorizadas em termos estéticos. Estas diferentes colorações vão também ser avaliadas no estado endurecido.

Em termos de retração imediatamente após a amassadura e preparação de provetes notou-se que a argamassa com 50% de terra “sugava” de imediato a água, dando a ideia que a argamassa secava muito rapidamente e se tornava difícil de trabalhar. As argamassas com 5% e 10% de terra apresentavam um aspeto leitoso e apesar do espalhamento estar dentro dos valores expectáveis, apresentavam alguma dificuldade de trabalhabilidade. Tentou-se ainda avaliar a retração inicial de secagem, avaliando a retração das argamassas no molde, antes da desmoldagem. Verificou-se que as argamassas de referência, com 5% e 10% de terra apresentavam uma pequena retração observável pelo descolamento dos provetes ao molde. No caso das argamassas com 25% e 50% tal não ocorreu. Significa que pouca terra implica rápida absorção de água, mais terra resulta numa evaporação mais lenta da água.

Tendo em conta a execução das argamassas e os ensaios no estado fresco considerou-se que a argamassa com 25% de terra apresentava as melhores características de aplicabilidade e trabalhabilidade, sendo simultaneamente uma das que possibilitava a formulação de argamassas mais ecológicas (com menor teor de ligante processado industrialmente). Posto isto, de entre as argamassas com terra, escolheu-se esta para ensaiar no murete de taipa exposto às condições ambientais exteriores.

8.3.2. Características das argamassas aplicadas no suporte de tijolo

8.3.2.1 Dureza superficial por durómetro Shore A (28 dias e 90 dias) das argamassas sobre tijolo

As gamas de valores obtidas neste ensaio, aos 28 e 90 dias, apresentam-se na Figura 8.12 e correspondem ao valor médio dos vários pontos medidos no provete (medições num tijolo de cada argamassa) e o respetivo desvio-padrão. Os valores obtidos no ensaio encontram-se no Quadro 9.2 e no Anexo A.5.

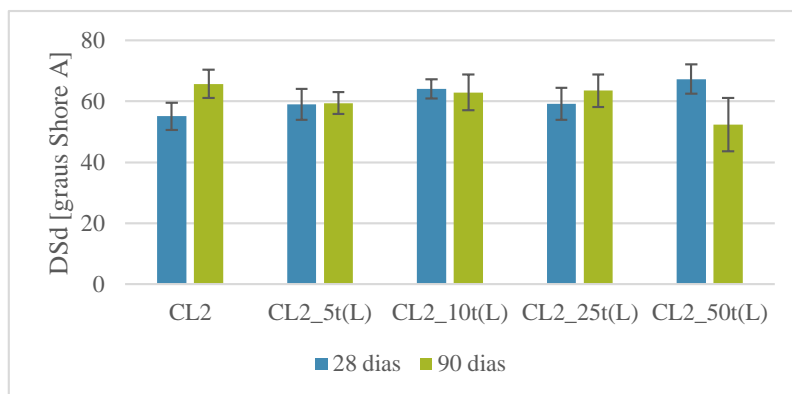


Figura 8.12 – Resultados da dureza superficial por durómetro das argamassas aplicadas em suporte de tijolo (28 e 90 dias)

A dureza superficial das argamassas aplicadas nos tijolos, analisada aos 28 dias de cura, através do durómetro, não mostrou resultados muito variados. Todas as argamassas apresentam valor médio e desvio-padrão de dureza $60,9 \pm 10,2$ Shore A, o que denota uma baixa variação mas um elevado desvio-padrão.

Observou-se que, de um modo geral, aos 28 dias este parâmetro aumentou ligeiramente com o aumento da quantidade de terra adicionada (excetuando a argamassa com 25% de terra que diminuiu ligeiramente em relação à com 10%, embora tenha mesmo assim aumentado em relação à padrão), o que é vantajoso para as argamassas com terra.

Este ensaio não é muito preciso na medida em que, se estiverem grãos da areia mais grossa à superfície, quando se coloca o durómetro em contacto para se registar o valor, por vezes a escala é ultrapassada. Durante o ensaio foi necessário encontrar os “melhores” pontos para medir a dureza superficial e daí terem-se efetuado 10 medições por argamassa.

Também aos 90 dias, a dureza superficial das argamassas aplicadas nos tijolos, através do durómetro, apresentou valor médio e desvio-padrão de $60,8 \pm 12,7$ Shore A, não sendo elevada a variação mas de novo elevado o desvio-padrão. A tendência difere dos 28 dias de cura. Neste caso a dureza superficial diminui em relação à argamassa de referência, para 5% de terra. Para 10% e 25% aumenta, mas mantém-se sempre inferior à argamassa de referência. A utilização de 50% de terra implica uma diminuição superior da dureza superficial, contrariamente aos 28 dias.

Entre as duas idades, a dureza superficial mantém-se constante para 5% e 10% de terra adicionada, aumenta aos 90 dias para a argamassa de referência e com 25% de terra, e diminui aos 90 dias na argamassa com 50% de terra.

8.3.2.2 Condutibilidade térmica (28 e 90 dias) das argamassas sobre tijolo

A condutibilidade térmica dos tijolos foi analisada aos 28 dias e aos 90 dias de cura sobre um tijolo revestido com cada argamassa. Tratando-se de um ensaio não destrutivo foi possível obter a comparação entre idades. Os resultados médios (resultantes de 6 medições) e os desvios-padrão encontram-se na Figura 8.13. Os valores obtidos no ensaio encontram-se no Quadro 9.2 e no Anexo A.6.

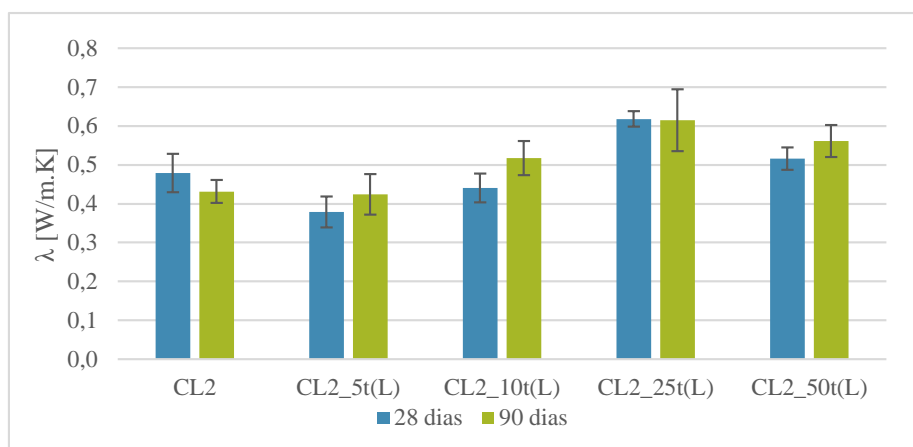


Figura 8.13 – Resultados da condutibilidade térmica das argamassas aplicadas no suporte de tijolo (28 e 90 dias)

A condutibilidade térmica dos tijolos mostrou-se inferior, tanto aos 28 dias como aos 90 dias, na argamassa com 5% de terra; no entanto a redução atenua-se aos 90 dias. É possível observar que em comparação com a argamassa padrão, quando se acrescentou 5% de terra, a condutibilidade diminuiu, mas com acrescentos superiores de terra, foi aumentando até aos 25%. Com 50% de terra, volta a diminuir, mas no entanto mantém-se superior à argamassa de referência. Esta argamassa apenas de cal aérea e areia reduz a sua condutibilidade térmica entre os 28 e os 90 dias de cura. Já as argamassas com incorporação de terra tomam valores mais elevados de condutibilidade térmica aos 90 dias de cura (exceto a argamassa com 25% de terra). No entanto, o valor médio e o desvio-padrão obtidos para todas as argamassas foi de $0,49 \pm 0,11$ W/m.K aos 28 dias e $0,51 \pm 0,13$ W/m.K aos 90 dias de cura, o que, com as devidas ressalvas mas comparativamente aos valores de rebocos tradicionais tabelados no ITE 50 do LNEC (Pina dos Santos & Matias, 2006), denota bastante boas características.

8.3.2.3 Velocidade de propagação dos ultrassons (28 e 90 dias) nas argamassas sobre tijolo

A velocidade de propagação dos ultrassons para os 28 dias e 90 dias de cura apresenta-se na Figura 8.14. Em todas as argamassas verificou-se uma redução da velocidade de propagação dos ultrassons aos 90 dias, em comparação com os 28 dias, que se pode ficar a dever, eventualmente, a um menor teor de humidade dos provetes. Enquanto aos 28 dias a tendência mostrava um aumento genérico da velocidade com o aumento da percentagem de terra, aos 90 dias observou-se um ténue aumento quando se acrescentou 5% de terra em comparação com a argamassa de referência, mas para as restantes substituições os valores mantiveram-se aproximadamente constantes.

Enquanto que aos 28 dias o valor médio e desvio-padrão de todas as argamassas é de 1347 ± 165 [m/s], aos 90 dias são de 988 ± 156 m/s. Notou-se alguma variação entre pontos próximos e pontos longínquos no mesmo tijolo com a mesma argamassa. Os valores obtidos no ensaio encontram-se no Quadro 9.2 e no Anexo A.7.

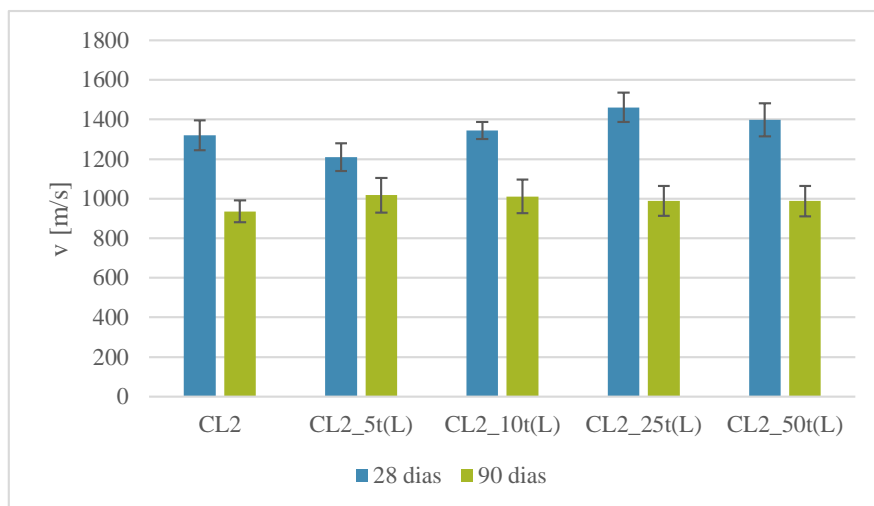


Figura 8.14 – Resultados da velocidade de propagação dos ultrassons das argamassas aplicadas em suporte de tijolo (28 e 90 dias)

8.3.2.4 Absorção de água sob baixa pressão por tubos de Karsten (28 e 90 dias) sobre tijolo

Apresentam-se nas Figuras 8.15 e 8.16, às idades de 28 e de 90 dias, a absorção de água durante o ensaio (60 minutos) com os tubos de Karsten. Os valores dos coeficientes obtidos no ensaio encontram-se no Quadro 9.3 e no Anexo A.8.

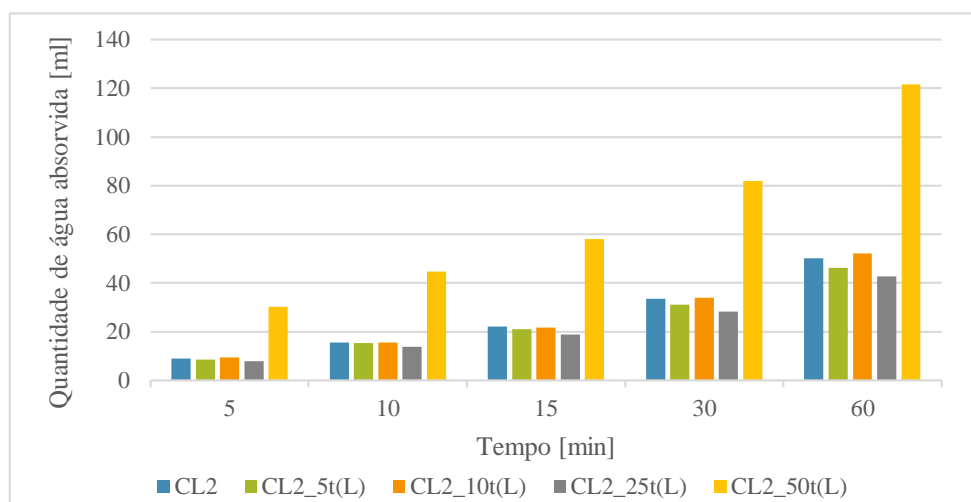


Figura 8.15 – Quantidade de água absorvida aos 28 dias (tubos de Karsten)

Aos 28 dias a tendência é clara relativamente à absorção de água sob baixa pressão. A absorção é gradual ao longo do tempo decorrido do ensaio e em todas as medições é possível observar que a argamassa com 5% de terra absorve menos água do que a argamassa de referência, só de cal aérea. No entanto a argamassa com 10% de terra absorve mais do que as duas primeiras e a argamassa com 25% de terra é a que absorve menos água. A argamassa com 50% de terra absorve uma quantidade muito superior às restantes argamassas, tendo até dificultado a execução do ensaio propriamente dito

de cal aérea e terra

A influência da terra como ligante

devido à rápida e elevada absorção de água (Figura 8.15). Aos 28 dias a argamassa com melhor comportamento corresponde à argamassa com 25% de terra.

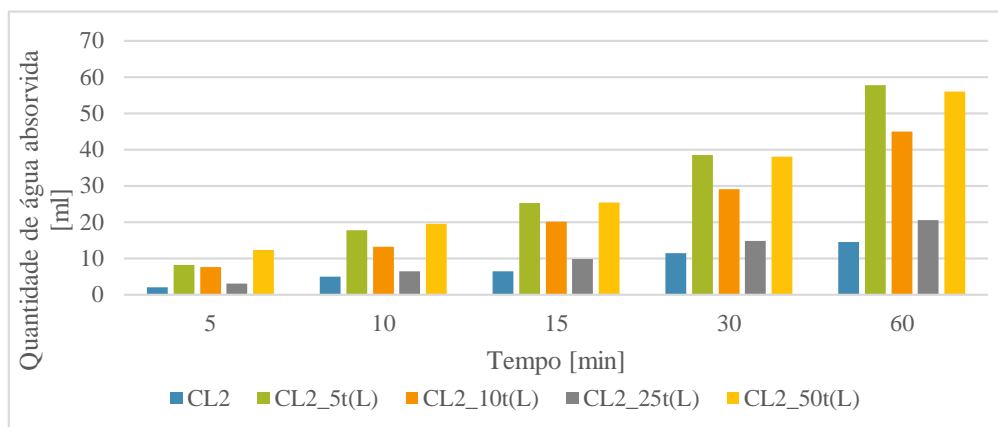


Figura 8.16 – Quantidade de água absorvida aos 90 dias (tubos de Karsten)

Aos 90 dias nota-se uma grande diferença em relação à capacidade de absorção das diferentes argamassas. Primeiramente a escala de valores da quantidade de água absorvida reduziu para metade, estando os provetes mais secos a esta idade. Aqui a argamassa de referência foi a que absorveu menos água ao longo de todo o ensaio, seguida de perto da argamassa com 25% de terra. A argamassa com 10% de terra tem aproximadamente o mesmo comportamento demonstrado aos 28 dias. Apesar da argamassa com 50% de terra continuar a ser a que absorve uma quantidade mais elevada de água, a argamassa com 5% de terra aos 90 dias obteve valores próximos e até superiores a essa, no final do ensaio. A argamassa com melhor comportamento aos 90 dias (excetuando a argamassa de referência) é novamente a argamassa com 25% de terra (Figura 8.16).

Nas Figuras 8.17 e 8.18 mostra-se o período de tempo que cada argamassa demorou a absorver 4 ml de água através de tubos de Karsten, aos 28 e 90 dias. Os valores de ensaio encontram-se no Quadro 9.3 e no Anexo A.8.

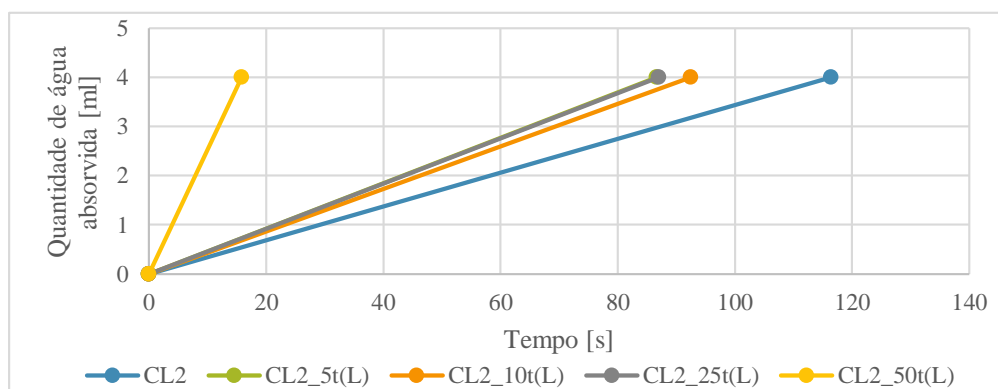


Figura 8.17 – Período de tempo para absorver 4 ml de água aos 28 dias

Aos 28 dias a absorção inicial (correspondente a 1 tubo de Karsten de 4 ml) é mais rápida na argamassa com 50% de terra e mais lenta quando se trata da argamassa de referência. As argamassas com 5%, 10% e 25% de terra apresentam comportamento semelhante entre elas, estando os valores entre os da argamassa de referência e da com 50% de terra, mas mais perto da argamassa de referência. A argamassa que demonstra melhor comportamento inicial (excetuando a argamassa de referência) é a argamassa com 10% de terra, embora as com 5% e 25% não fiquem muito aquém (Figura 8.17).

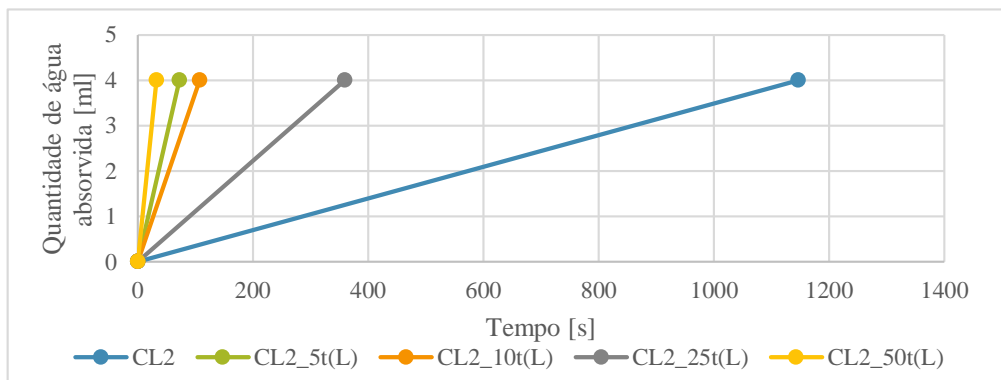


Figura 8.18 – Tempo para absorver 4 ml de água aos 90 dias

Aos 90 dias há uma notória evolução no tempo decorrido para absorver 4 ml de água. A argamassa de referência continua a ser a que demora mais tempo a absorver água inicialmente e a argamassa com 50% de terra mostrou ser a que absorve água mais rapidamente. Logo de seguida vem a argamassa com 5% de terra e a argamassa com 10% de terra. Nesta idade observa-se novamente que a argamassa com 25% de terra absorve água mais lentamente, entre as argamassas com terra. Ainda assim, o comportamento distancia-se bastante da argamassa de referência. A argamassa que demonstrou melhor comportamento (excetuando a argamassa de referência) foi assim a argamassa com 25% de terra (Figura 8.18).

Verifica-se que, face às características analisadas, todas as argamassas com terra apresentam comportamento muito mais desfavorável comparativamente à argamassa de referência, só de cal, que regista uma melhoria substancial de comportamento dos 28 para os 90 dias de idade.



Figura 8.19 – Aspeto do revestimento sobre o tijolo durante o ensaio de absorção de água sob baixa pressão (CL2_50t(L)), aos 28 dias

A Figura 8.19 mostra a argamassa com 50% de terra aplicada em suporte de tijolo, durante o ensaio de absorção de água sob baixa pressão, aos 28 dias. Ao fim de 5 minutos a argamassa já se encontrava com uma grande quantidade de água absorvida como é possível observar. Este facto implicou o descolamento de alguns tubos antes do final do ensaio, tal era a quantidade de água absorvida. Este revestimento sofreu uma pancada lateral durante a cura e como tal teve influência no comportamento do tubo 1. Apesar disso, a repetição deste ensaio ao revestimento aplicado após a amassadura 3 e 4, que não sofreu nenhum distúrbio, teve o mesmo comportamento de rápida e elevada absorção de água.

8.3.2.5 Porosimetria de mercúrio de argamassas sobre tijolo

A percentagem de mercúrio incrementada em função do diâmetro dos poros apresenta-se na Figura 8.20. A quantidade de mercúrio cumulativa para cada argamassa apresenta-se na Figura 8.21.

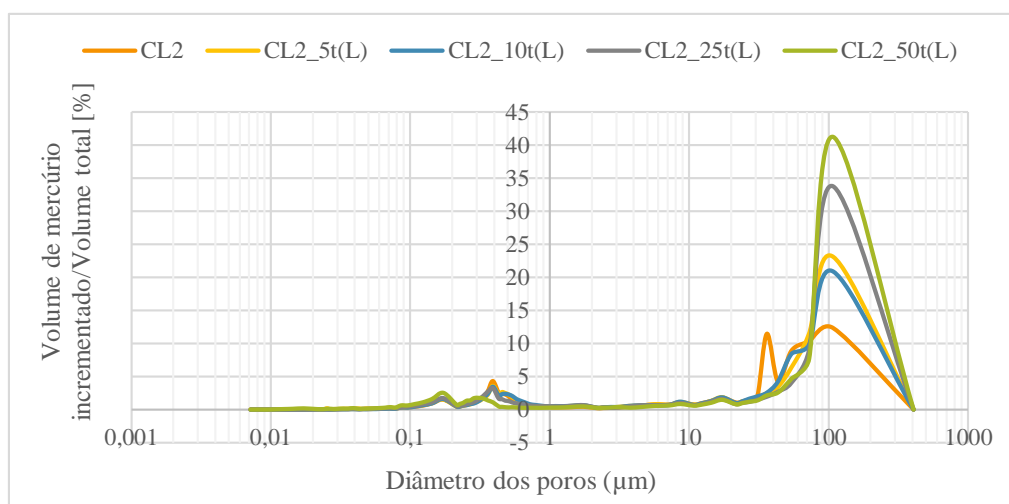


Figura 8.20 – Percentagem de incremento de mercúrio nas argamassas aplicadas em suporte de tijolo, aos 90 dias

A maior parte das argamassas em estudo apresentam a maior quantidade de poros de maior dimensão com 100 μm de diâmetro e poros de menor dimensão entre os 0,1 e 0,5 μm de diâmetro. Pode observar-se na Figura 8.20 que a crescente introdução de terra implica o aumento da percentagem de poros de maior dimensão com 100 μm e diminui a percentagem de poros de menor dimensão. As argamassas com 5% e 10% de terra apresentam uma distribuição de diâmetros muito semelhante. A percentagem de poros de maior dimensão é de 41% para a argamassa com 50% de terra e de 12% para a argamassa de referência. A argamassa de referência apresenta uma percentagem de poros entre os 30 e 40 μm praticamente inexistente nas argamassas com terra. Verifica-se que, para menos quantidade de cal, a gama capilar contém poros mais pequenos e para maior quantidade de cal (menos terra) a gama capilar contém poros ligeiramente maiores.

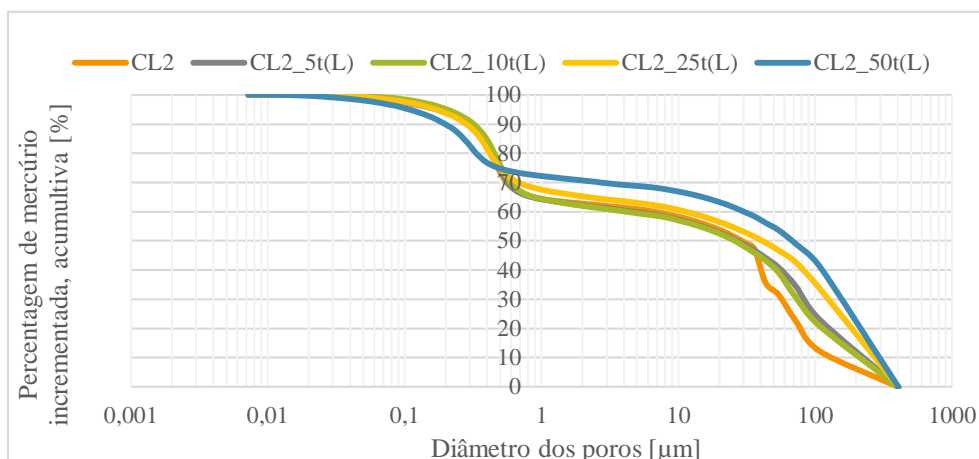


Figura 8.21 – Percentagem de mercúrio incrementada cumulativa, das argamassas aplicadas em suporte de tijolo, aos 90 dias

Na Figura 8.21 observa-se que a percentagem maior de poros está entre os diâmetros de 1 e 1000 μm (75%) e 25 % dos poros é de menor dimensão. As argamassas de referência e com terra apresentam uma distribuição semelhante, afastando-se um pouco no caso da argamassa com 50% de terra. Quanto maior a introdução de terra, maior a quantidade de poros de maior dimensão e menor a quantidade de poros de menor dimensão.

Através do ensaio da porosimetria de mercúrio obtém-se também valores para a porosidade aberta que serão comparados com os resultados obtidos no ensaio da porosidade aberta pelo método hidrostático. Na Figura 8.22 apresentam-se os valores da porosidade aberta das argamassas aplicadas em suporte de tijolo. No Quadro 9.6 encontram-se os resultados obtidos.

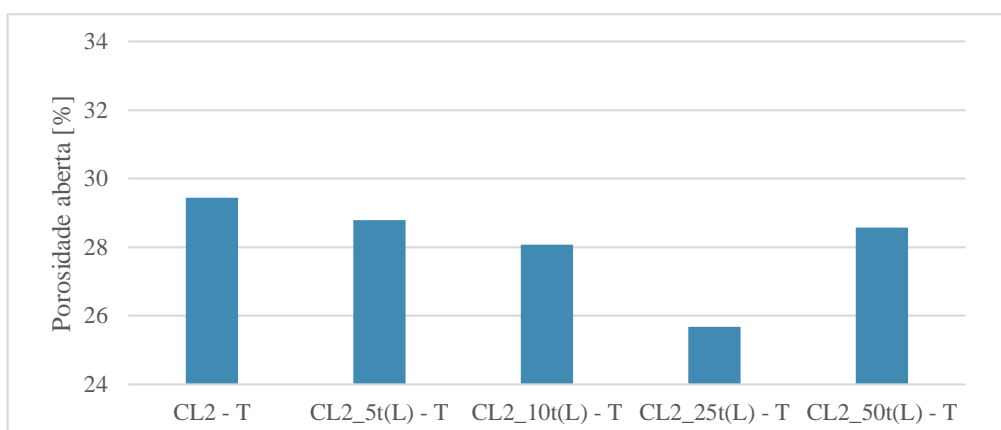


Figura 8.22 – Porosidade aberta (porosímetro de mercúrio), das argamassas aplicadas em suporte de tijolo, aos 90 dias

Pode observar-se que a porosidade aberta diminui com o aumento da percentagem de terra, com exceção da argamassa com 50% de terra. Comparativamente aos restantes suportes analisados mais à frente (Figuras 8.27 e 8.35) verifica-se que esta tendência é contrária aos prismas e argamassa aplicada no murete. Entende-se que os poros do tijolo, de diâmetros mais pequenos que os da taipa,

exercem sucção da água da argamassa que aperta os poros. Quanto mais água é absorvida pelo tijolo, menor a percentagem de poros existentes na argamassa no estado endurecido.

8.3.2.6 Conclusões preliminares

Tendo em conta os ensaios às argamassas no estado endurecido, aplicadas em suporte de tijolo, aos 28 e 90 dias, a escolha da argamassa com melhores comportamentos é difícil. A argamassa com 5% de terra apresenta vantagens apenas na condutibilidade térmica, onde registou o menor valor; no entanto, numa aplicação em reboco, com espessura de cerca de 2 cm, a diferença registada entre argamassas não será muito relevante. A argamassa com 10% de terra mostrou uma dureza superficial mais elevada que algumas das restantes argamassas e também uma condutibilidade térmica baixa (semelhante à argamassa de referência). A argamassa com 25% de terra demonstrou um bom comportamento relativamente à absorção de água sob baixa pressão, tanto inicialmente como ao fim de uma hora. A argamassa com 50% de terra só apresentou bons resultados na dureza superficial (valor mais elevado). Todas as argamassas mantêm o mesmo comportamento em relação à velocidade de propagação dos ultrassons. A argamassa com 10% de terra tem mais poros de menor dimensão, e dentro das argamassas com terra é também esta a que contém menor quantidade de poros de maiores dimensões. Tendo em conta que a absorção de água é o aspeto mais relevante de entre os ensaios realizados, salienta-se a argamassa com 25% de terra. Com outras características positivas segue-se a argamassa com 10% de terra. Ambas as argamassas implicam vantagens económicas e ecológicas pela diminuição da quantidade de cal aérea e aumento da terra utilizada.

8.3.3. Características dos rebocos de argamassas aplicadas no murete

As argamassas aplicadas no murete de taipa foram ensaiadas aos 90 dias de cura. Não foi possível efetuar o ensaio de condutibilidade térmica a estas argamassas porque não se encontrou maneira de medir com a sonda de contacto e não existia espessura para aplicar a sonda de profundidade.

8.3.3.1 Dureza superficial por durómetro Shore A dos rebocos do murete

As leituras efetuadas ao longo da altura de cada painel apresentam-se no Quadro 8.5.

A média e o desvio-padrão das medições foi de 63 ± 8 graus Shore A para a argamassa CL2 e 70 ± 20 graus Shore A para a argamassa CL2_25t(L). Mais uma vez os resultados são bastante variados e não é possível observar uma tendência evidente. Poderá existir alguma influência no facto do painel CL2 estar mais junto ao bordo e o outro ser mais central. No entanto salienta-se o facto da dureza do reboco com terra ser genericamente da mesma ordem, embora com mais elevado desvio-padrão.

Quadro 8.5 – Dureza superficial por durômetro dos rebocos de argamassas aplicadas no murete de taipa (90 dias)

Dureza Superficial [graus Shore A]	CL2	CL2_25t(L)
	61	60
	55	40
	75	64
	68	94
	55	92

8.3.3.2 Resistência superficial por esclerômetro pendular dos rebocos do murete

As medições ao longo dos dois painéis – 3 medições por cada nível, em 3 níveis – apresentam-se no Quadro 8.6.

Quadro 8.6 – Resistência superficial das argamassas aplicadas no murete de taipa, aos 90 dias

Resistência superficial [graus Vickers]	CL2			CL2_25t(L)		
	75	75	76	75	75	79
	80	85	85	85	87	85
	80	78	79	75	80	81

A resistência média e o desvio-padrão foram de 79 ± 4 graus Vickers na argamassa de referência e 80 ± 4 graus Vickers na argamassa com 25% de terra. A resistência é superior na argamassa com terra, o que pode trazer vantagens relativamente aos choques a que os rebocos ficam expostos. No entanto, o erro associado pode considerar-se inexistente, pelo que não há variações que diferenciem as argamassas no que toca a este ensaio. Os valores da resistência superficial das argamassas são inferiores à resistência do suporte – taipa – no entanto, enquanto que a taipa tinha tendência para se esboroar durante as medições, no caso das argamassas tal não ocorreu. Verifica-se que há uma compactação localizada devida ao impacto do peso do equipamento, mas o reboco não sofreu danos.

8.3.3.3 Velocidade de propagação dos ultrassons do reboco do murete

Os valores obtidos no ensaio da velocidade de propagação dos ultrassons encontram-se no Quadro 8.7. Em cada nível dos painéis foram efetuadas 3 medições.

Quadro 8.7 – Velocidade de propagação dos ultrassons nas argamassas aplicadas no murete de taipa, aos 90 dias

CL2				CL2_25t(L)		
Velocidade [m/s]						
	AB	AC	AD	AB	AC	AD
Nível 1	583	603	652	724	861	861
Nível 2	713	645	490	853	799	780
Nível 3	534	473	398	814	623	616
Nível 4	613	437	473	949	667	759

A média e o desvio-padrão para cada argamassa foram de 551 ± 94 m/s na argamassa de referência e de 775 ± 98 m/s na argamassa com 25% de terra.

Presume-se que haja uma maior compactidade da argamassa com 25% de terra, visto que a velocidade é superior. As condições de humidade podem ter influenciado este parâmetro.

8.3.3.4 Absorção de água sob baixa pressão por tubos de Karsten dos reboco no murete

A absorção de água sob baixa pressão ao fim de cada intervalo de tempo de 5, 10 15, 30 minutos e até aos 60 minutos de ensaio apresentam-se nas Figuras 8.23 e 8.24.

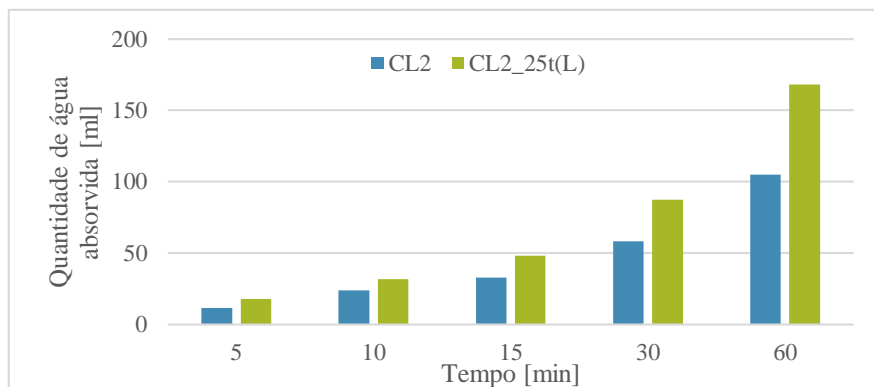


Figura 8.23 – Absorção de água sob baixa pressão dos rebocos de argamassas aplicados no murete de taipa, aos 90 dias

Na Figura 8.23 observa-se uma absorção de água crescente e constante no decorrer do ensaio, até aos 60 minutos. Verifica-se que o reboco de argamassa com 25% de incorporação de terra absorve mais água do que a argamassa de referência. As quantidades elevadas de água absorvida por ambos os rebocos pode resultar de absorção de água também pelo suporte de taipa, que como se viu, absorve uma maior quantidade de água em comparação ao suporte de tijolo.

Na Figura 8.24 observa-se que a absorção inicial, dos primeiros 4 ml de água, ocorre mais lentamente na argamassa com terra do que na argamassa de referência só de cal aérea, o que é um aspeto a salientar positivamente.

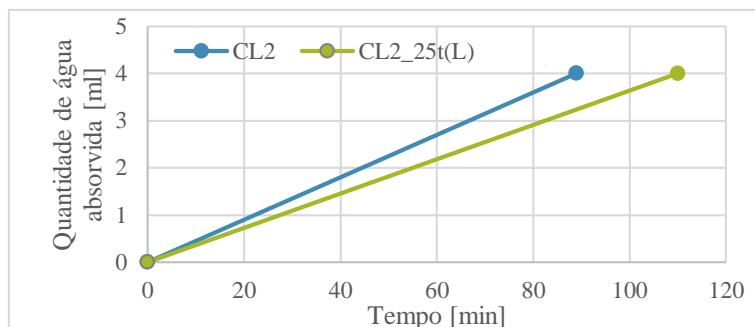


Figura 8.24 – Tempo que os rebocos de argamassa aplicados no murete de taipa demoram a absorver 4 ml de água, aos 90 dias

8.3.3.5 Porosimetria de mercúrio de amostras de rebocos do murete

A percentagem de mercúrio incrementada em função do diâmetro dos poros apresenta-se na Figura 8.25. A quantidade de mercúrio cumulativa para cada argamassa apresenta-se na Figura 8.26. A letra “M” serve para diferenciar as amostras de reboco do murete. A palavra “seco” é referente à zona mais seca do painel do murete e a palavra “húmido” é referente à zona mais húmida do painel do murete.

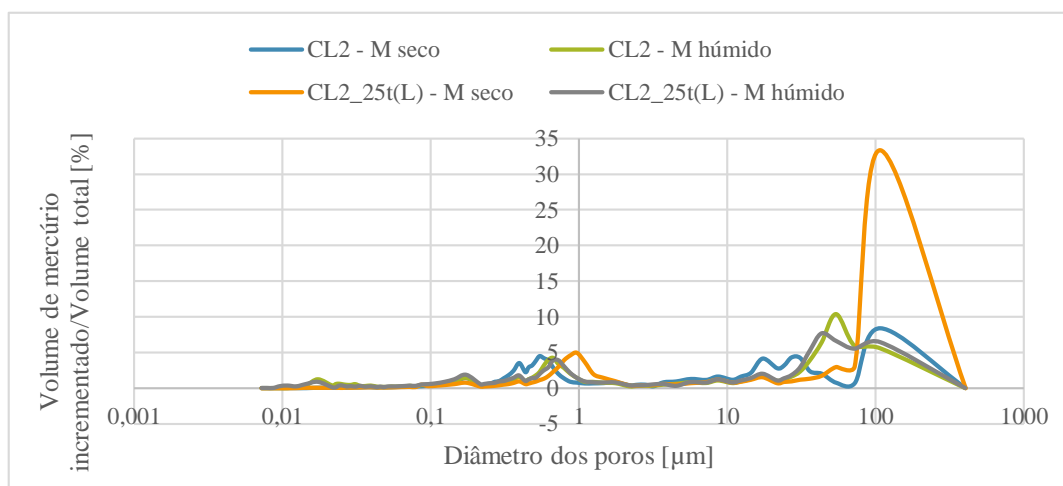


Figura 8.25 – Percentagem de incremento de mercúrio nos rebocos de argamassa aplicados no murete de taipa (90 dias)

Observa-se na Figura 8.25 que os resultados das amostras retiradas da zona mais seca de cada painel de reboco diferem dos resultados para a zona mais húmida. A porosimetria da argamassa de referência, só de cal aérea, apresenta maior quantidade de poros de maiores dimensões na zona mais seca; no entanto na zona mais húmida contém maior quantidade de poros inferiores a 100 μm. As diferenças mais notórias ocorrem para a argamassa com 25% de terra. Esta argamassa, ainda húmida, apresenta uma distribuição do tamanho dos poros que se assemelha à argamassa de referência também em zona húmida. Na zona seca, apresenta uma quantidade muito superior de poros de

maiores dimensões. A argamassa de referência contém poros capilares de diâmetro menor, comparativamente à argamassa com 25% de terra. Estes aspetos poderão influenciar e apresentar justificação para as resistências mecânicas e principalmente a absorção de água, avaliados nesta dissertação através da dureza superficial e da absorção sob baixa pressão.

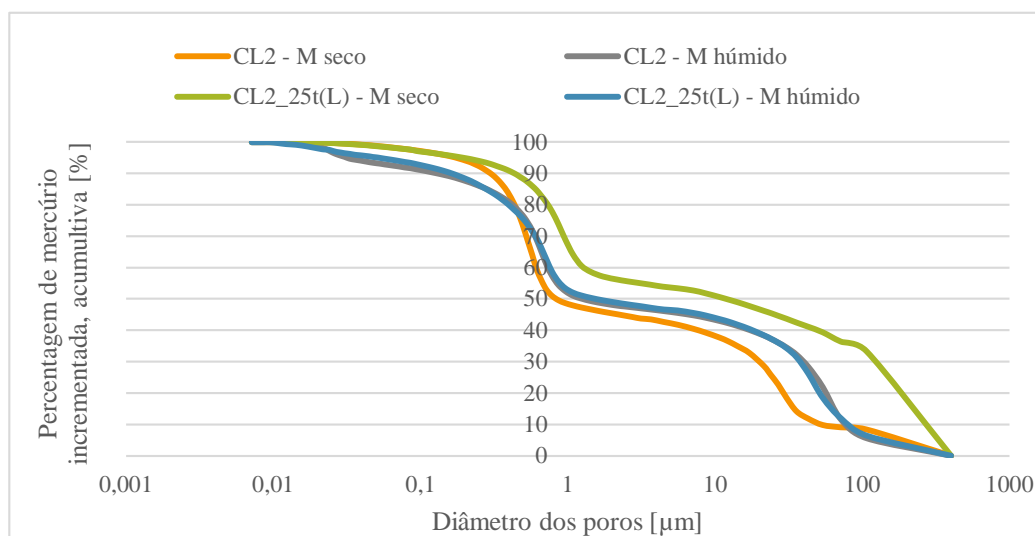


Figura 8.26 – Percentagem de mercúrio incrementada acumulativa, das argamassas aplicadas no murete (90 dias)

Na Figura 8.26 é ainda mais notória a semelhança de comportamentos entre a argamassa de referência e a argamassa com 25% de terra, ambas retiradas da zona húmida. O incremento de mercúrio é de 75% para os poros de maiores dimensões e de 25% para os poros de menores dimensões. A amostra da argamassa com 25% de terra retirada da zona mais seca contém 90% de poros de maiores dimensões e apenas 10% de poros de menores dimensões, podendo ser este um fator favorável relativamente à capilaridade.

Na Figura 8.27 apresentam-se os valores da porosidade aberta, dada pelo porosímetro de mercúrio, das argamassas aplicadas no murete de taipa. No Quadro 9.6 encontram-se os resultados obtidos.

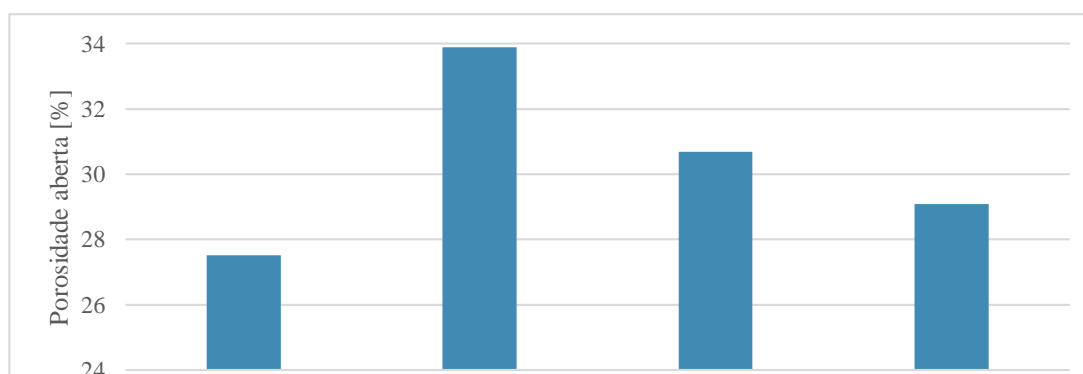


Figura 8.27 – Porosidade aberta (porosímetro de mercúrio) das argamassas aplicadas em suporte de taipa, aos 90 dias

Observa-se que há diferenças entre a zona mais seca e húmida do murete, principalmente na argamassa de referência (CL2). E que a introdução de terra aumenta a porosidade aberta na zona seca, mas diminui na zona húmida. Na zona seca do murete há maior sucção de água da argamassa, o que diminui a percentagem dos poros, por aperto dos mesmos.

8.3.3.6 Conclusões preliminares

Tendo em conta os resultados obtidos dos ensaios efetuados aos rebocos aplicados no murete de taipa salienta-se a dureza superficial e a resistência superficial da argamassa com 25% de terra, com valores superiores à argamassa de referência. No que toca à velocidade dos ultrassons, também aqui a argamassa com 25% de terra mostra estar melhor internamente ligada, permitindo a propagação mais rápida dos ultrassons comparativamente à argamassa só de cal aérea. O ponto negativo da argamassa com terra é relativo à absorção total de água sob baixa pressão. Esta argamassa absorve maior quantidade de água ao longo do ensaio do que argamassa de referência. Apenas a absorção de água inicial (4ml) mostra maior lentidão em relação à argamassa CL2. Posto isto, a argamassa com 25% de terra apresenta melhores comportamentos do que a argamassa de referência, com exceção da absorção de água mas apenas ao fim de um determinado período de tempo, que é agravada com a introdução desta quantidade de terra. O ensaio de porosimetria mostrou que as condições de cura influenciam a distribuição dos poros das argamassas, principalmente na argamassa com incorporação de terra.

8.3.4. Características das argamassas através dos provetes prismáticos

Toda esta caracterização foi efetuada aos 90 dias de idade das argamassas.

8.3.4.1 Massa volúmica das argamassas

As massas volúmicas foram determinadas tendo em conta as medições aos 7, 28 e 90 dias de cura. As medições não estão totalmente corretas já que os provetes se mostraram bastante friáveis inicialmente, o que implicou a degradação de alguns cantos e alguma perda de massa mesmo durante as próprias medições. Sendo assim, a Figura 8.28 é apenas indicativa da massa volúmica dos provetes referentes às amassaduras 1 e 2 e às amassaduras 3 e 4, e serve para perceber o que acontece às diferentes argamassas durante o processo de cura.

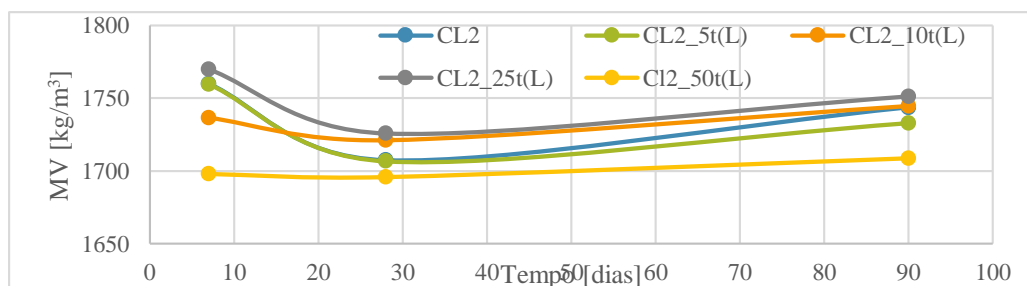


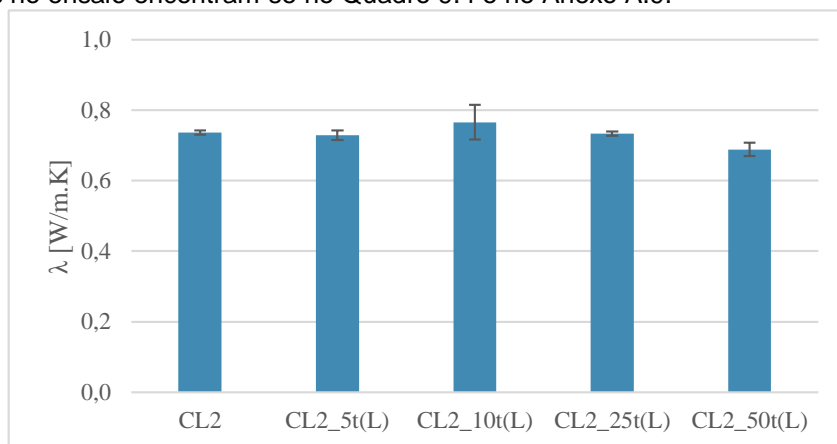
Figura 8.28 – Massa volúmica das argamassas dos provetes aos 7, 28 e 90 dias de cura

Genericamente as argamassas diminuem de massa volúmica dos 7 para os 28 dias, devido à secagem da água de amassadura, e aumentam para os 90 dias, muito possivelmente devido à carbonatação.

Observa-se que a argamassa com 50% de terra tem a menor massa volúmica em cada idade, é a argamassa que perde menos massa por secagem, a avaliar pela diferença entre os 7 e os 28 dias e a que menos massa volúmica ganha aos 90 dias. É também esta a argamassa que possui menor quantidade de cal aérea e por isso, onde ocorre menor carbonatação. O andamento da argamassa com 10% de terra é semelhante ao da argamassa com 50% de terra, mas com valores mais elevados de massa volúmica (gráfico quase paralelo). A argamassa com 5% de terra tem um comportamento muito semelhante à argamassa de referência e apresenta aproximadamente a mesma massa volúmica; esta só varia aos 90 dias, em que a de referência é um pouco superior. A argamassa com 25% de terra é a que apresenta sempre maior massa volúmica, embora com um andamento semelhante às argamassas de referência e com 5% de terra.

8.3.4.2 Condutibilidade térmica das argamassas

O gráfico resultante do ensaio de condutibilidade térmica apresenta-se na Figura 8.29. Os valores obtidos no ensaio encontram-se no Quadro 9.4 e no Anexo A.9.



A condutibilidade térmica de todas argamassas tem como média e desvio-padrão $0,74 \pm 0,05$

Figura 8.29 – Condutibilidade térmica das argamassas nos provetes prismáticos, aos 90 dias

W/m.K. Os resultados são diferentes dos obtidos para a argamassa aplicada no suporte de tijolo, como era esperado, devido às condições do ensaio. Enquanto que nas argamassas com terra sobre tijolo a condutibilidade aumentava até aos 25% de terra, neste caso, a condutibilidade térmica da argamassa com 5% de terra diminuiu em relação à argamassa de referência, no entanto aumentou para 10% de terra. Para 25% e 50% de terra volta a diminuir, obtendo-se para 50% de terra um valor inferior à argamassa de referência. Tendo em conta estes resultados, a argamassa com 50% de terra traz vantagens em relação ao isolamento térmico, enquanto a argamassa com 10% de terra toma o valor de condutibilidade térmica mais elevado. Os resultados não são diretamente comparáveis com o ITE50 do LNEC devido ao facto da sonda utilizada não ter a área de contacto completa com a argamassa; no entanto os resultados não diferem muito do valor de condutibilidade térmica para argamassas de cal e

areia ou bastardas de 0,80 W/m.K, no entanto diferem bastante do valor da condutibilidade térmica para argamassas e rebocos tradicionais de 1,3 W/m.K (Pina dos Santos & Matias, 2006).

8.3.4.3 Módulo de elasticidade dinâmico das argamassas

Na Figura 8.30 encontram-se os resultados do ensaio do módulo de elasticidade dinâmico aos 90 dias. Os valores obtidos no ensaio encontram-se no Quadro 9.4 e no Anexo A.10.

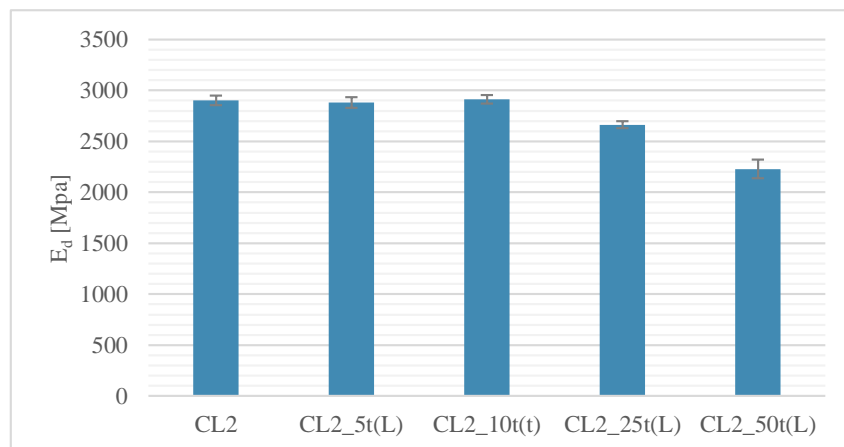


Figura 8.30 – Módulo de elasticidade dinâmico das argamassas nos provetes prismáticos

O módulo de elasticidade dinâmico (E_d) indica se um material é muito ou pouco deformável. A deformabilidade habilita a argamassa a acompanhar, sem fendilhar, movimentos do suporte. No entanto, o resultado deste ensaio não destrutivo indicia também as resistências mecânicas do material. Através deste ensaio pôde verificar-se que a deformabilidade tem tendência a aumentar com a introdução de terra, particularmente com substituições de 25% e de 50%. Efetivamente, as argamassas com mais quantidade de terra (CL2_25t(L) e CL2_50t(L)) obtiveram módulos de elasticidade dinâmicos mais baixos. A argamassa que apresentou o maior valor foi a CL2_10t(L) mas com valor praticamente idêntico à argamassa de referência e com 5% de terra.

De salientar também o baixo desvio-padrão apresentado em cada argamassa e o facto de todas apresentarem valores inferiores a 3000 MPa mas superiores a 2200 MPa, os que as situa numa gama bastante interessante particularmente para aplicações em rebocos.

8.3.4.4 Resistência à tração por flexão e à compressão das argamassas

Na Figura 8.31 encontram-se os resultados do ensaio de resistência à tração por flexão e à compressão. Os valores obtidos no ensaio encontram-se no Quadro 9.4 e no Anexo A.11.

Analogamente ao módulo de elasticidade dinâmico estão as resistências à tração por flexão e à compressão. As três grandezas acompanham a mesma tendência; no entanto a diminuição das resistências da argamassa com 5% de terra é mais notória face à argamassa de referência que para o E_d , assim como o aumento da argamassa com 10% de terra. As resistências mecânicas diminuiram quando se acrescentou 5% de terra, aumentaram quando se acrescentou 10% de terra e voltaram a diminuir para maiores percentagens, o que pode ser prejudicial mas era exetável, uma vez que se

A influência da terra como ligante

está a substituir parcialmente um ligante por uma argila. A argamassa CL2_50t(L) regista assim as menores resistências mecânicas e a CL2_10t(L) obteve as resistências mais elevadas (tal como o módulo de elasticidade dinâmico). A argamassa com 25% de substituição apresenta, no entanto, um valor de resistência à tração muito semelhante ao da argamassa com apenas 5% de terra e pouco inferior à de referência, o que é facto de registo muito positivo.

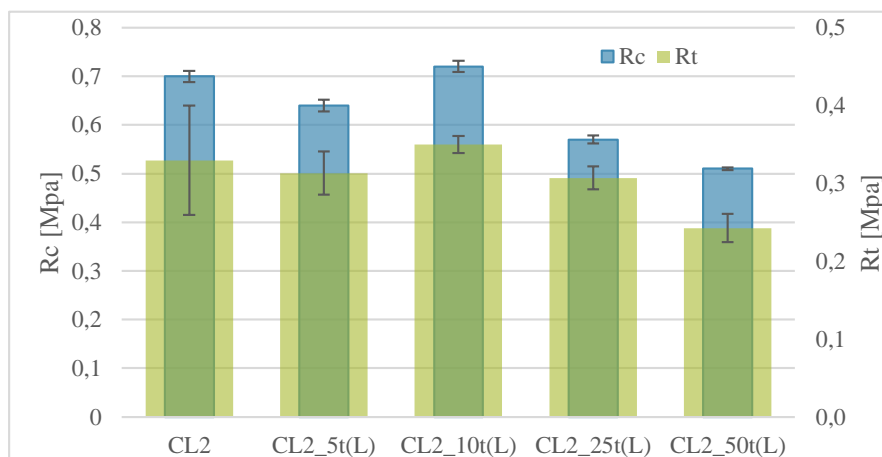


Figura 8.31 – Resistências à tração e à compressão das argamassas nos provetes prismáticos

O valor médio e desvio-padrão de todas as argamassas é $0,31 \pm 0,04$ MPa para a resistência à flexão e $0,63 \pm 0,11$ MPa para a resistência à compressão.

8.3.4.5 Porosidade aberta e massa volúmica aparente das argamassas

Na Figura 8.32 encontram-se os resultados do ensaio de porosidade aberta e massa volúmica aparente das argamassas em provetes prismáticos. Os valores obtidos no ensaio encontram-se no Quadro 9.4 e no Anexo A.12.

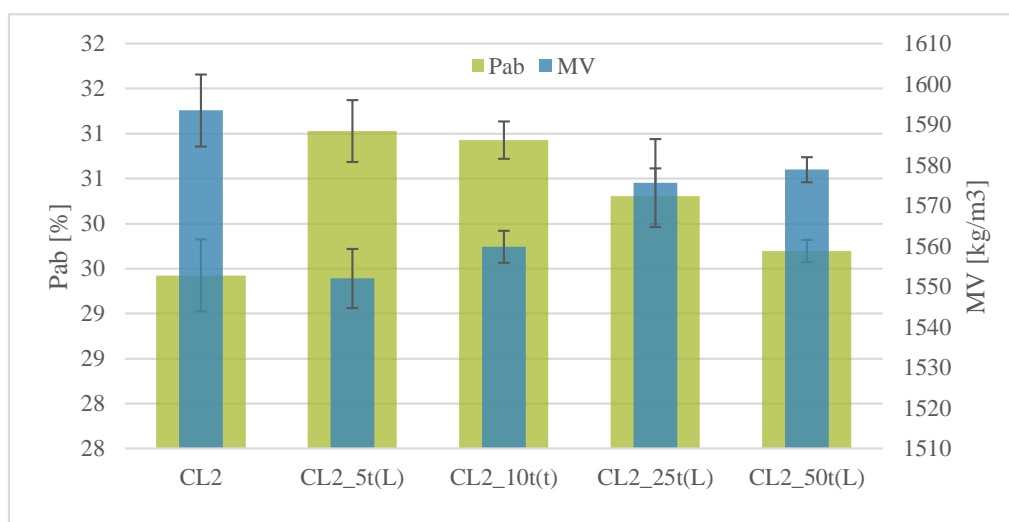


Figura 8.32 – Porosidade aberta e massa volúmica aparente das argamassas nos provetes prismáticos

“A porosidade, característica essencial nas argamassas de edifícios antigos, contribui para um melhor ambiente na habitação, controlando a quantidade de humidade no seu interior, que pode ser proveniente do solo ou do interior da habitação” (Margalha, 2011).

A massa volúmica aparente é inversamente proporcional à porosidade aberta. Quando uma cresce, a outra decresce. Observou-se que a introdução de pequenas quantidades de terra (5% e 10%) fez aumentar o volume de poros no interior da argamassa. Para quantidades superiores diminuiu a porosidade aberta, mas esta nunca chegou a ser inferior ao valor da argamassa de referência (CL2). No entanto todas as argamassas registam valores numa gama entre os quase 30% e os 31% (valor médio e desvio-padrão de todas as argamassas de $30,3 \pm 0,9$ %), pelo que a variação detetada por este ensaio foi insignificante. Estes valores de porosidade aberta vão ser comparados com os obtidos, à mesma idade, pelo ensaio de porosimetria de mercúrio.

8.3.4.6 Porosimetria de mercúrio das argamassas

A percentagem de mercúrio incrementada em função do diâmetro dos poros apresenta-se na Figura 8.33. A quantidade de mercúrio cumulativa para cada argamassa apresenta-se na Figura 8.34. Os resultados individuais apresentam-se no Anexo A.15.

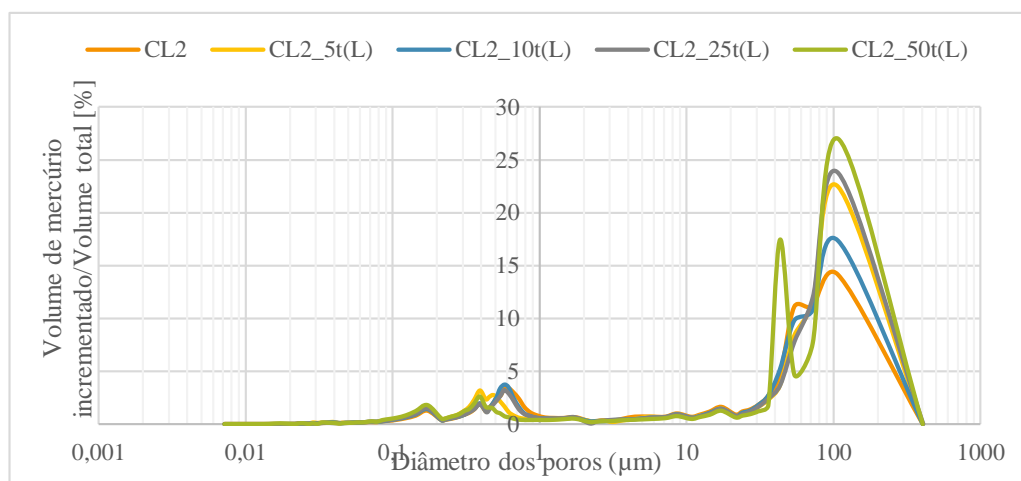


Figura 8.33 – Percentagem de incremento de mercúrio nas argamassas em provetes prismáticos, aos 90 dias

As argamassas apresentam os poros de maior dimensão com diâmetros na ordem dos 100 µm e poros de menor dimensão entre 0,2 e 0,7 µm. Observa-se um aumento dos poros de maiores dimensões com a introdução de terra. As argamassas com 5% e 25% de terra apresentam uma distribuição semelhante. A argamassa com 10% de terra contém menor percentagem de poros de maiores dimensões, comparativamente às restantes argamassas com terra. A argamassa com 50% de terra contém 27% de poros de maior dimensão da ordem dos 100 µm, enquanto a argamassa de referência apresenta apenas 11%. 15% dos poros da argamassa com 50% de terra estão na ordem dos 40 µm, o que não acontece nas restantes argamassas. Quanto aos poros de menores dimensões, as argamassas com 5% e 50% de terra contêm uma percentagem de cerca de 3-5% de poros da ordem dos 0,4 µm e as restantes argamassas – referência, 10% e 25% de terra – contêm poros da ordem dos 0,6 µm.

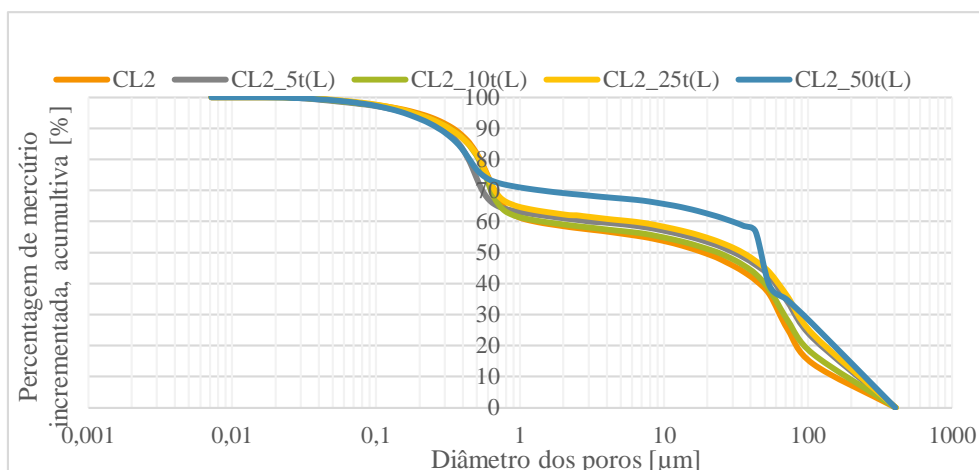


Figura 8.34 – Percentagem de mercúrio incrementada cumulativa, das argamassas em provetes prismáticos, aos 90 dias

As argamassas apresentam aproximadamente 75% de poros de maior dimensão e 25% de poros de dimensões inferiores. A distribuição das dimensões é bastante aproximada entre as diferentes argamassas, com exceção da argamassa com 50% de terra.

Na Figura 8.35 apresentam-se os resultados das porosidades abertas das argamassas dos prismas. No Quadro 9.6 encontram-se os resultados obtidos.

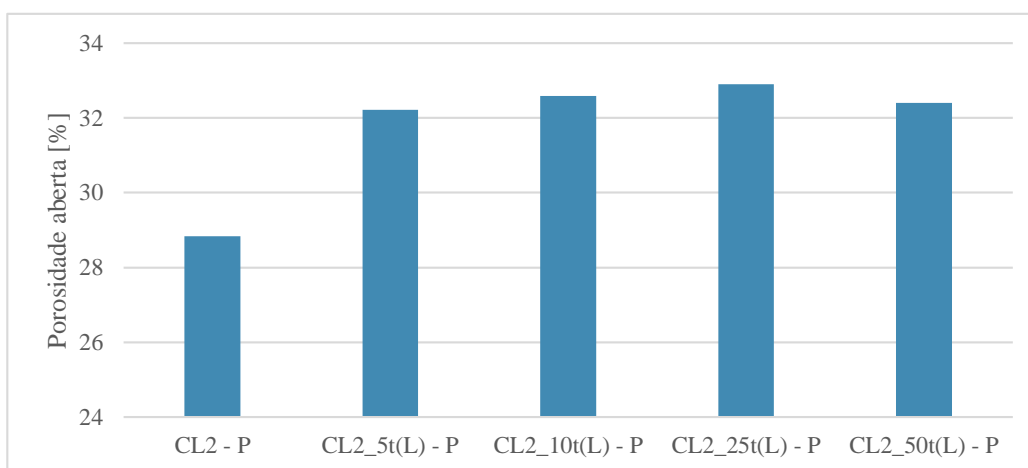


Figura 8.35 – Porosidade aberta (porosimetria de mercúrio) das argamassas dos prismas, aos 90 dias

Contrariamente às argamassas em suporte de tijolo, observa-se um aumento da porosidade aberta com o aumento da percentagem de terra. No entanto as variações não são significativas.

8.3.4.7 Absorção de água por capilaridade das argamassas

As curvas obtidas no ensaio de capilaridade para cada argamassa encontram-se na Figura 8.36. Os coeficientes de capilaridade e os valores assintóticos apresentam-se na Figura 8.37. Os valores obtidos no ensaio encontram-se no Quadro 9.5 e no Anexo A.13.

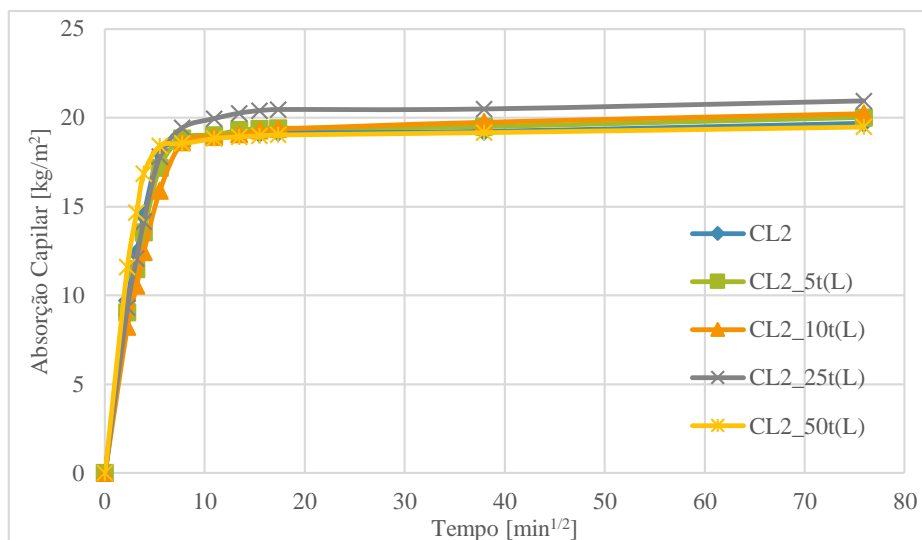


Figura 8.36 – Curvas de capilaridade

Como se pode observar na Figura 8.36 as argamassas têm comportamentos em relação à absorção de água muito próximos uns dos outros, o que significa que só interpretando o coeficiente de capilaridade e o valor assintótico se pode chegar a conclusões mais precisas. No entanto é de ressaltar a pouca influência que as percentagens de terra utilizadas apresentam nesta característica.

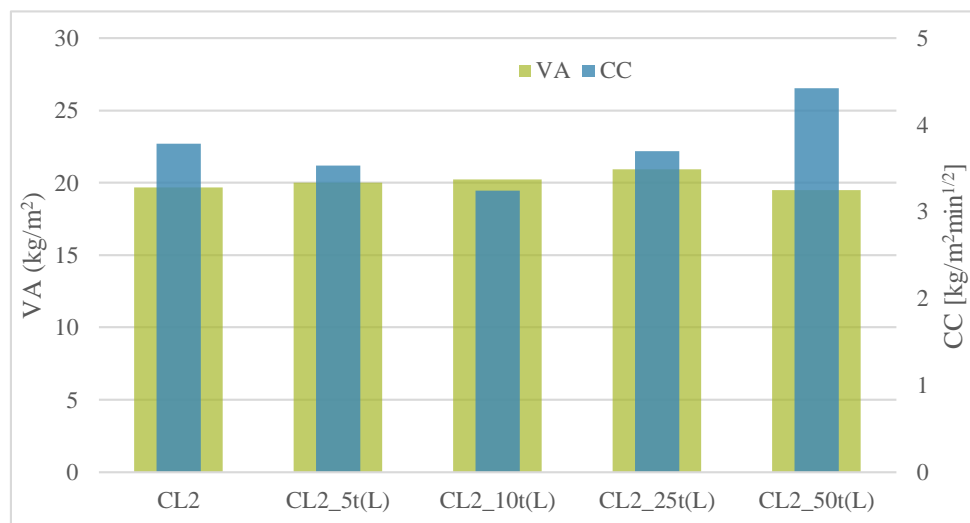


Figura 8.37 – Coeficiente de Capilaridade e Valor Assintótico das argamassas em provetes prismáticos

Os valores do CC são muito semelhantes em todas as argamassas, com ligeira vantagem das argamassas com 5%, 25% e particularmente 10% de terra, face à argamassa de referência. Salienta-se pela negativa a argamassa do 50% de terra. O valor médio e desvio-padrão de todas as argamassas é $3,37 \pm 0,42 \text{ kg}/(\text{m}^2\text{min}^{1/2})$.

A influência da terra como ligante

Os valores do VA são ainda mais semelhantes entre si, com ligeiríssima vantagem neste caso para a argamassa com 50% de terra adicionada. O valor médio e desvio-padrão de todas as argamassas é $20,07 \pm 0,68 \text{ kg/m}^2$.

É possível observar na Figura 8.38 a “altura” da frente de água atingida nos provetes no início do ensaio, que é notoriamente superior nas argamassas mais à direita, com 50% de terra. A argamassa N31 que se vê na figura, correspondente a um provete da argamassa com 10% de terra, mostra uma subida de água substancialmente inferior.



Figura 8.38 – Provetes durante o ensaio de capilaridade

Esta situação denota que as argamassas com terra analisadas, quanto à absorção capilar, são competitivas face à argamassa de referência, só de cal aérea, com vantagens para a argamassa com 10% de terra que consegue um melhor equilíbrio entre o CC e o VA. No entanto, as argamassas com 5% e com 25% também apresentam valores aceitáveis.

8.3.4.8 Secagem das argamassas

As curvas de secagem das argamassas encontram-se na Figura 8.39. A taxa de secagem e o índice de secagem apresentam-se na Figura 8.40. Os valores obtidos no ensaio encontram-se no Quadro 9.5 e no Anexo A.14.

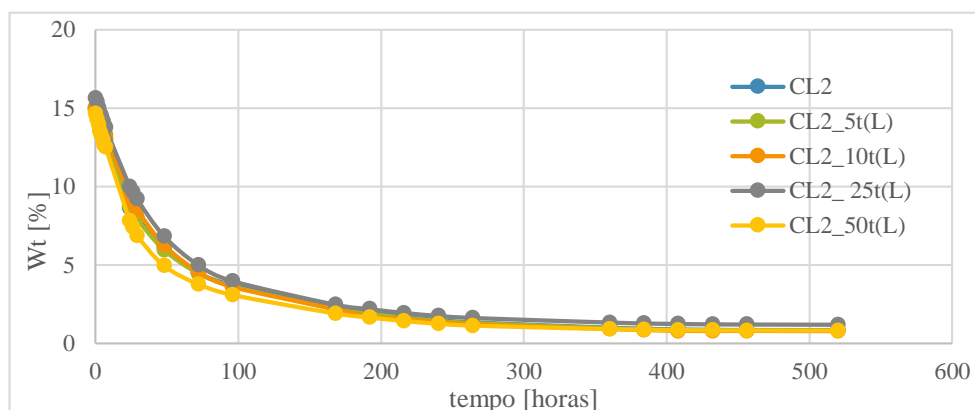


Figura 8.39 – Curvas de secagem

As curvas referentes à secagem também apresentam um comportamento muito semelhante, sendo dificilmente diferenciáveis apenas com a observação da Figura 8.39. Esta situação mostra que

a introdução destas percentagens de terra não altera significativamente a secagem das argamassas com base em cal aérea analisadas. Só a análise da taxa de secagem e do índice de secagem poderão revelar resultados mais conclusivos (Figura 8.40).

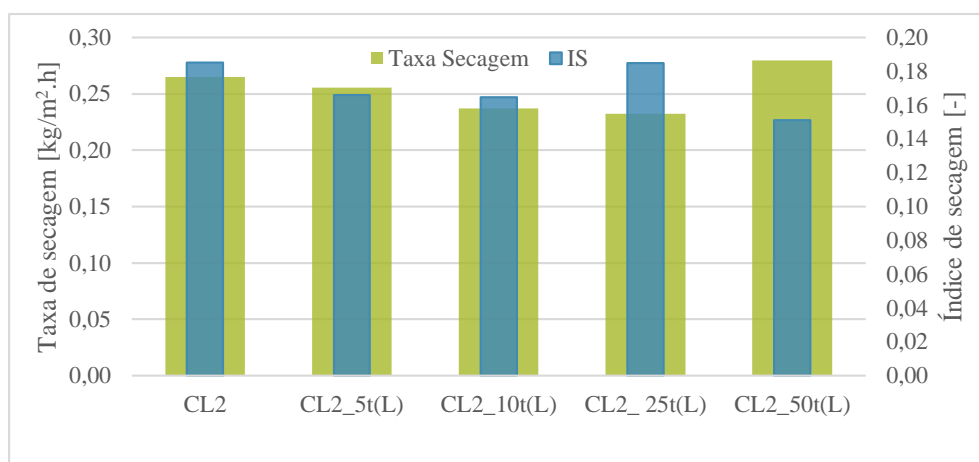


Figura 8.40 – Taxa de Secagem e Índice de Secagem das argamassas em provetes prismáticos

Uma maior taxa de secagem (TS) indicia uma maior rapidez inicial de secagem. Os valores da taxa de secagem diminuem sequencialmente com a adição de quantidades de terra superiores, exceto para a argamassa com 50% de terra que toma valores superiores à argamassa de referência. No entanto, o valor médio e desvio-padrão de todas as argamassas é $0,25 \pm 0,03 \text{ kg}/(\text{m}^2.\text{h})$.

Um menor índice de secagem (IS) indicia uma maior facilidade de secagem total. Os valores do índice de secagem diminuem com o aumento da percentagem de terra, neste caso com exceção da argamassa com 25% de terra, que obteve o valor mais elevado, superando também o valor da argamassa de referência. O valor médio e desvio-padrão de todas as argamassas é de $0,17 \pm 0,02 [-]$

Estas argamassas com terra são também competitivas em relação à argamassa de referência só de cal aérea, quanto à secagem, com vantagem para a argamassa com 10% de terra que consegue um melhor equilíbrio entre a TS e o IS.

8.3.4.9 Resistência aos sulfatos das argamassas

A variação de massa das argamassas devida à ação dos sulfatos observa-se na Figura 8.41 e no Quadro 9.5. Os valores obtidos apresentam-se no Anexo A.16

Da análise da Figura 8.41 é possível verificar que no final do ensaio a argamassa com melhor resistência à ação dos sulfatos é a argamassa com 10% de terra, em comparação com a argamassa de referência e com as restantes argamassas com terra. A argamassa só de cal aérea e a argamassa com 5% de terra seguem aproximadamente o mesmo comportamento no decorrer do ensaio. A argamassa com 25% de terra segue também inicialmente a mesma tendência destas argamassas, mas a partir do 20º ciclo começa a afastar-se e a sofrer uma perda superior de massa. A argamassa com 50% de terra perde sempre maiores quantidades de massa ao longo de todo o ensaio, sendo a que demos-

trou pior comportamento face ao ataque por sulfatos. Os sulfatos cristalizam em poros de maior diâmetro sem problemas, no entanto, nos poros de menor diâmetro produzem pressões ao cristalizar. Por isto, as argamassas com percentagem mais elevadas de diâmetros pequenos da gama capilar terão maior perda de massa por ataque dos sulfatos, o que influencia a durabilidade da argamassa.

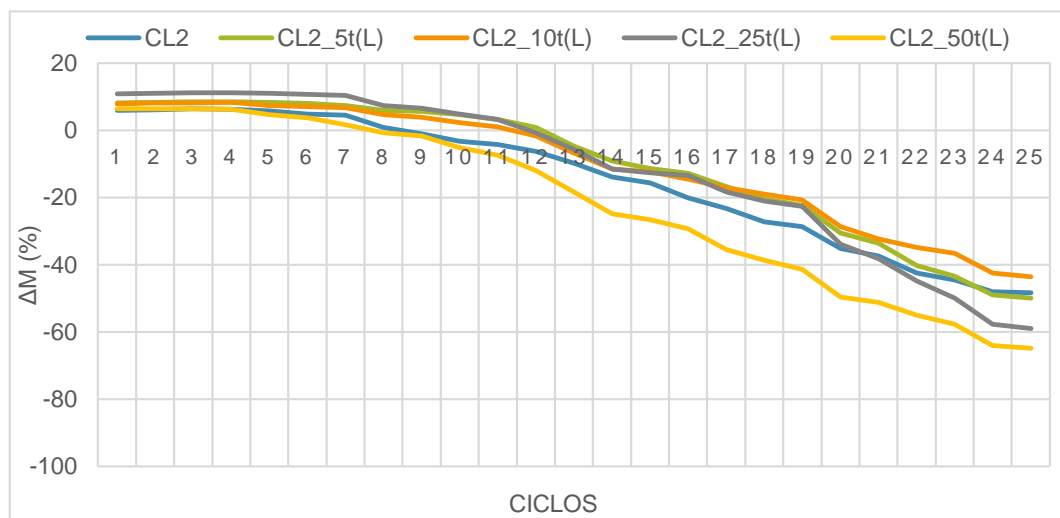


Figura 8.41 – Variação de massa das argamassas ao longo dos ciclos do ensaio de resistência aos sulfatos

O valor médio e o desvio-padrão da argamassa com 10% de terra, com melhor comportamento, foi de $43,63 \pm 4,51$ %. O valor médio e o desvio-padrão da argamassa que perdeu mais massa (50% de terra) foi de $64,88 \pm 0,92$ %. O desvio-padrão da primeira argamassa é superior ao da segunda o que pode dever-se à fragilidade deste tipo de argamassas. O manuseamento diário dos provetes para a realização do ensaio pode ter influência nestes desvios. Observando o Anexo A.16 verifica-se que um dos provetes perdeu mais massa do que os outros dois ensaiados. Ainda assim, a argamassa com 10% de terra é a que perde menos massa devido ao ataque destes sais.

8.3.4.10 Conclusões preliminares

Os ensaios realizados aos provetes prismáticos de argamassa mostraram que a argamassa com 10% de terra é preferencial em relação às restantes argamassas estudadas em praticamente todos os ensaios, com exceção da condutibilidade térmica e do valor assintótico de absorção de água por capilaridade. As resistências mecânicas são boas também na argamassa com 25% de terra. Quer a argamassa com 5% de terra, quer a argamassa com 25% de terra obtiveram bons resultados de coeficiente de capilaridade e taxa de secagem. Também através dos parâmetros ensaiados nesta fase se verifica que a introdução de terra induz benefícios às argamassas de cal aérea, o que se torna igualmente positivo economicamente e ecologicamente. A coloração das argamassas no estado endurecido é muito interessante a nível estético e pode possibilitar a dispensa de aplicação de pintura como acabamento final.

9. DISCUSSÃO DOS RESULTADOS

Apresentam-se nos Quadros 9.1, 9.2, 9.3, 9.4 e 9.5 os resultados globais dos ensaios efetuados às argamassas no estado fresco, no estado endurecido em suporte de tijolo, aos rebocos de argamassa sobre o murete e nos prismas.

Quadro 9.1 – Resultados médios e desvios-padrão (quando apropriados) das argamassas no estado fresco: Consistência por espalhamento, Massa volúmica, Teor de ar e Retenção de água

Argamassas	Consistência por espalhamento [mm]	Massa volúmica [kg/m ³]	Teor de ar [%]	Retenção de água [%]
CL2	146,6 ± 1,4	1926	4,3	91,4
CL2_5t(L)	147,5 ± 3,0	1950	4,5	91,7
CL2_10t(L)	151,6 ± 4,3	1945	4,6	89,1
CL2_25t(L)	147,1 ± 3,6	1960	4,5	90,0
CL2_50t(L)	145,8 ± 4,0	1952	5,1	88,9

Quadro 9.2 – Resultados médios e desvios-padrão das argamassas aplicadas no tijolo (28 e 90 dias): Dureza superficial, Condutibilidade térmica e Velocidade de propagação dos ultrassons

Argamassas	Dureza Superficial [DS _D Shore A]		Condutibilidade térmica [W/m.K]		Velocidade Ultrassons [m/s]	
	28 dias	90 dias	28 dias	90 dias	28 dias	90 dias
CL2	55,1 ± 8,8	65,7 ± 9,2	0,48 ± 0,10	0,43 ± 0,06	1224 ± 360	936 ± 109
CL2_5t(L)	59,0 ± 10,2	59,4 ± 7,1	0,38 ± 0,08	0,42 ± 0,10	1210 ± 142	926 ± 365
CL2_10t(L)	64,1 ± 6,3	62,9 ± 11,7	0,44 ± 0,07	0,52 ± 0,09	1345 ± 85	918 ± 361
CL2_25t(L)	59,2 ± 10,4	63,5 ± 10,7	0,62 ± 0,04	0,62 ± 0,16	1462 ± 148	892 ± 347
CL2_50t(L)	67,3 ± 9,7	52,4 ± 17,6	0,52 ± 0,06	0,56 ± 0,08	1399 ± 168	893 ± 348

Quadro 9.3 – Resultados médios e desvios-padrão das argamassas aplicadas no tijolo (28 e 90 dias): Absorção de água sob baixa pressão

Argamassas	Coeficiente de absorção de 4ml (28 dias) [kg/m ² min ^{1/2}]	Coeficiente de absorção de 4ml (90 dias) [kg/m ² min ^{1/2}]	Coeficiente de absorção 60'' (28 dias) [kg/m ² min ^{1/2}]	Coeficiente de absorção 60'' (90 dias) [kg/m ² min ^{1/2}]
CL2	5,98	1,90	13,50	3,91
CL2_5t(L)	6,93	7,57	12,43	15,51
CL2_10t(L)	6,71	6,22	13,99	12,11
CL2_25t(L)	6,91	3,40	11,48	5,53
CL2_50t(L)	16,21	11,31	32,68	15,06

de cal aérea e terra

A influência da terra como ligante

Quadro 9.4 – Resultados médios e desvios-padrão dos prismas, aos 90 dias: Módulo de elasticidade dinâmico, Resistências à compressão e à tração, Porosidade aberta (método hidrostático), Massa volúmica aparente e Condutibilidade térmica

Argamassas	Módulo de elasticidade dinâmico [MPa]	Resistência à compressão [Mpa]	Resistência à tração [Mpa]	Porosidade aberta [%]	Massa volúmica aparente [kg/m ³]	Condutibilidade térmica [W/m.K]
CL2	2902 ± 48	0,70 ± 0,14	0,33 ± 0,02	29,4 ± 0,8	1594 ± 18	0,74 ± 0,01
CL2_5t(L)	2880 ± 53	0,64 ± 0,06	0,31 ± 0,02	31,0 ± 0,7	1552 ± 15	0,73 ± 0,03
CL2_10t(L)	2914 ± 42	0,72 ± 0,02	0,35 ± 0,02	30,9 ± 0,4	1560 ± 8	0,77 ± 0,10
CL2_25t(L)	2662 ± 34	0,57 ± 0,03	0,31 ± 0,02	30,3 ± 0,6	1576 ± 22	0,73 ± 0,01
CL2_50t(L)	2229 ± 90	0,51 ± 0,04	0,24 ± 0,01	29,7 ± 0,3	1579 ± 6	0,69 ± 0,04

Quadro 9.5 – Resultados médios e desvios-padrão dos prismas, aos 90 dias: Capilaridade (Coeficiente de capilaridade e Valor assintótico), Secagem (Taxa de secagem e Índice de secagem) e Variação de massa aos 25 ciclos de ataque por sulfatos

Argamassas	Capilaridade		Secagem		Resistência aos sulfatos
	Coeficiente de capilaridade [kg/m ² min ^{1/2}]	Valor assintótico [kg/m ² .h]	Taxa de secagem [kg/m ²]	Índice de secagem [-]	Δm [%]
CL2	3,78 ± 0,18	19,68 ± 0,65	0,26 ± 0,01	0,19 ± 0,02	-48,40 ± 2,74
CL2_5t(L)	3,53 ± 0,18	20,02 ± 0,31	0,26 ± 0,01	0,17 ± 0,01	-49,96 ± 1,77
CL2_10t(L)	3,24 ± 0,17	20,25 ± 0,60	0,24 ± 0,01	0,16 ± 0,04	-43,63 ± 4,51
CL2_25t(L)	3,70 ± 0,17	20,94 ± 0,27	0,23 ± 0,04	0,18 ± 0,03	-59,08 ± 0,42
CL2_50t(L)	4,42 ± 0,01	19,49 ± 0,35	0,28 ± 0,02	0,15 ± 0,01	-64,88 ± 0,92

Quadro 9.6 – Resultados da porosidade aberta pelo porosímetro de mercúrio, aos 90 dias

Argamassas	Pab Prismas [%]	Pab Tijolo [%]	Argamassas	Pab Murete [%]
CL2	28,84	29,44	CL2 seco	27,52
CL2_5t(L)	32,22	28,79	CL2 húmido	33,89
CL2_10t(L)	32,59	28,08	CL2_25t(L) seco	30,68
CL2_25t(L)	32,91	25,68	CL2_25t(L) húmido	29,08
CL2_50t(L)	32,4	28,57	-	-

9.1. Comparação entre suportes

A caracterização do murete de taipa e do tijolo cerâmico permitiu compreender que a aplicação das mesmas argamassas em suportes diferentes implica também comportamentos distintos. A principal condicionante entre os diferentes suportes deve-se à elevada capacidade de absorção de água do murete contrariamente ao tijolo, o que influencia a perda de água da argamassa no estado fresco, que altera a microestrutura da argamassa, pode alterar a retração inicial da argamassa, e que posteriormente tem efeitos na argamassa no estado endurecido. A caracterização das argamassas através dos prismas permite o conhecimento da maioria das características mais importantes, mas em fase laboratorial, possibilitando a escolha da melhor combinação de constituintes que se presume que venham a obter um melhor comportamento quando sujeitos a exposições reais, mas deve ser validada por aplicações sobre suporte.

9.2. Comparação de resultados no estado fresco

A consistência por **espalhamento** das argamassas estudadas está próxima de outros estudos realizados com argamassas de cal aérea e traço 1:2. Faria *et al.* (2008) obteve um espalhamento de 168 mm, ao mesmo tempo que também foi conseguida uma boa trabalhabilidade; no entanto a areia utilizada nas argamassas era distinta e não é definida a relação água/ligante. Com a mesma areia e traço utilizado na presente dissertação foram realizadas argamassas por Branco (2013), também analisadas por Bandeira (2012), que registaram espalhamento de 129 ± 2 mm no caso de argamassa exatamente igual à de referência, com a mesma relação água/ligante, enquanto que na presente dissertação se obteve um valor de $146,6 \pm 1,4$ mm. A diferença entre os valores obtidos pode dever-se ao operador que efetuou as diferentes medições, e às condições de humidade relativa e temperatura em que se encontrava o laboratório. Mais uma vez é de notar que este ensaio não é muito preciso, já que todas as condições que implicam o ensaio influenciam bastante os resultados obtidos.

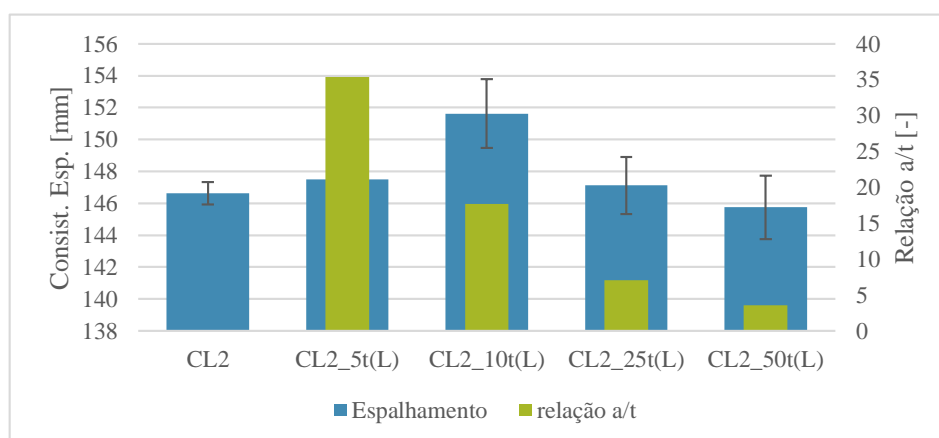


Figura 9.1 – Comparação entre a consistência por espalhamento e a relação a/t

A Figura 9.1 mostra a comparação entre a consistência por espalhamento e a relação água/terra. A relação água/terra segue a mesma tendência que o espalhamento, a partir dos 10% de terra. À medida que se introduziu terra, com a diminuição da relação água/terra ocorreu também a diminuição do espalhamento, podendo dizer-se que a diminuição da relação entre a água adicionada e a quantidade de terra utilizada influencia a trabalhabilidade da argamassa ao torná-la mais consistente.

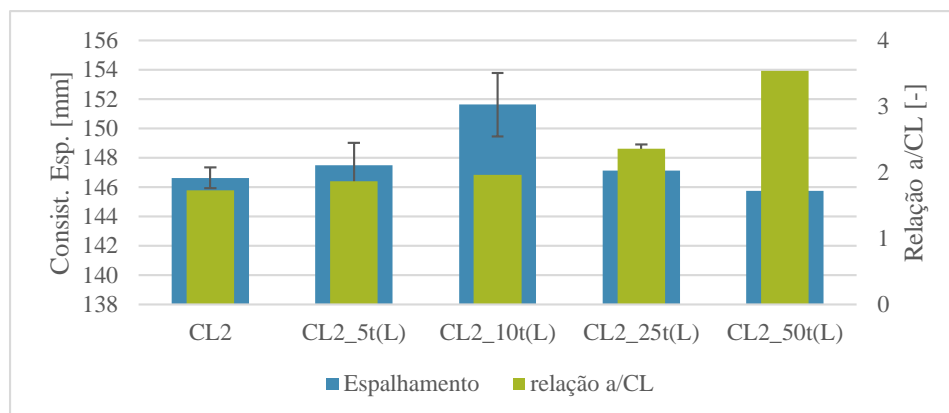


Figura 9.2 – Comparação entre a consistência por espalhamento e a relação a/CL

A Figura 9.2 mostra a comparação entre a consistência por espalhamento e a relação água/cal aérea. Neste caso há um acompanhamento das tendências até aos 10% de substituição de cal aérea por terra argilosa. Para as percentagens superiores, o aumento da relação água/cal aérea ocorre em simultâneo com a diminuição do espalhamento médio.

Do exposto parece que a relação água/cal aérea tem relação direta com a consistência das argamassas sem ou com baixa percentagem de terra, enquanto a relação água/terra expressa uma influência direta na consistência das argamassas com mais elevada percentagem de terra.

Os resultados obtidos para a **massa volúmica** no estado fresco, em média 1947 kg/m^3 , podem ser comparados com os de uma argamassa só da mesma terra argilosa e areia grossa (1872 kg/m^3) e com essa argamassa mas com 5%, 10% e 15% de adição de cal aérea (respetivamente 1873 , 1871 e 1854 kg/m^3) (Gomes *et al.*, 2012b). Enquanto que no estudo referido as argamassas com baixas adições de cal aérea à terra (fortalecimento do ligante) tendem a diminuir a massa volúmica, no presente estudo a substituição de cal por terra (como ligante) fez aumentar ligeiramente a massa volúmica, que se manteve constante para percentagens superiores de terra.

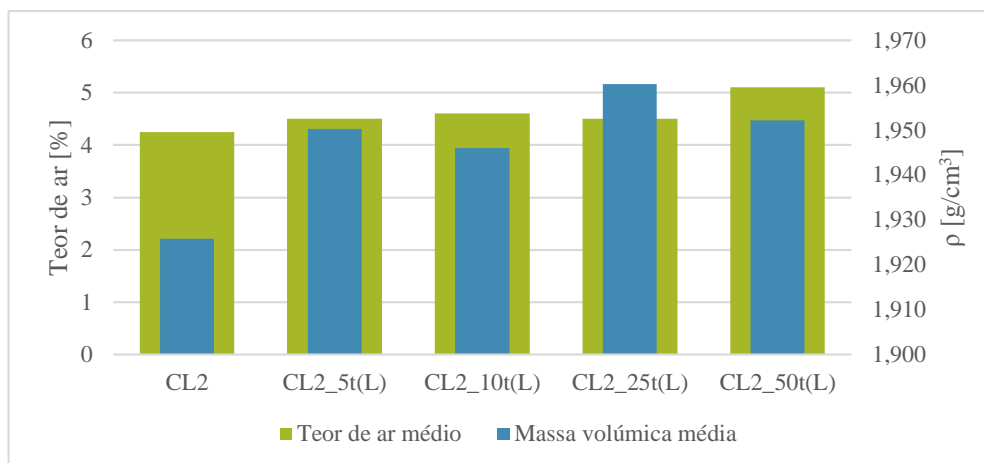


Figura 9.3 – Comparação entre o teor de ar e a massa volúmica no estado fresco

A Figura 9.3 mostra a comparação entre o teor de ar e a massa volúmica da argamassa fresca. Através desta comparação observa-se que quando a massa volúmica aumenta para 5% de terra, há também um acréscimo do teor de ar médio. No entanto, para 10% a diminuição da massa volúmica significa um ligeiro aumento do teor de ar. Contrariamente, para 25% de terra, o aumento da massa volúmica significa uma diminuição ligeira do teor de ar. O caso de 50% de terra é semelhante à argamassa com 10% de terra, ou seja, a redução do valor da massa volúmica resulta num aumento do teor de ar.

Os resultados do teor de ar mostram que a introdução de terra argilosa nas argamassas estudadas incrementa o teor de ar, portanto aumenta o volume de vazios no interior da argamassa. Estes resultados podem, de certa forma, estar relacionados com o aumento dos resultados do espalhamento. Os resultados estão em conformidade com a norma NP EN 459-1 (IPQ, 2011) que define que o teor de ar das argamassas de cal aérea (cálcica) é inferior ou igual a 12%.

Comparando o andamento dos gráficos do teor de ar e da consistência por espalhamento (Figura 9.4), verificou-se que é a mesma, com exceção da argamassa com 50% de terra. O aumento do espalhamento acompanha o aumento do teor de ar para 5% e 10 % de terra; já para 25% ambos os valores diminuem. Para 50% de terra, enquanto o teor de ar aumenta significativamente, contrariamente há uma redução do valor do espalhamento.

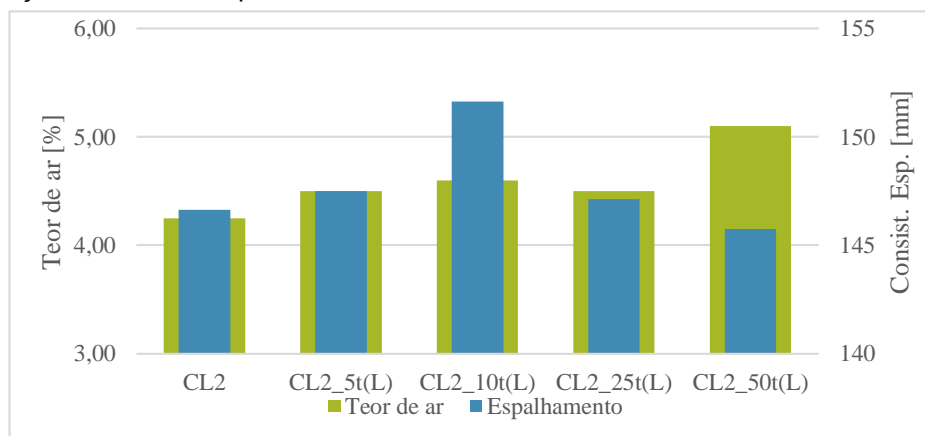


Figura 9.4 – Comparação entre o teor de ar e a consistência por espalhamento

A **retenção de água** das argamassas em estudo toma valores elevados, o que indica que a libertação da água e a sucção do suporte serão lentas, induzindo que não fendilhará muito inicialmente. No entanto a sucção do suporte está dependente da distribuição de dimensões dos poros de diâmetros capilares e da porosidade aberta ou total. Esta distribuição difere com a porosimetria do suporte em que a argamassa foi aplicada.

Segundo Faria (2004), a retenção de água é um fator de grande importância para as argamassas de revestimento de alvenarias antigas dada a elevada capacidade de absorção de água destas alvenarias. Os valores obtidos pela autora, com argamassas com uma areia de rio corrente, estão na mesma ordem de grandeza dos valores obtidos para uma argamassa de cal aérea e traço volumétrico 1:2, correspondente a 93%.

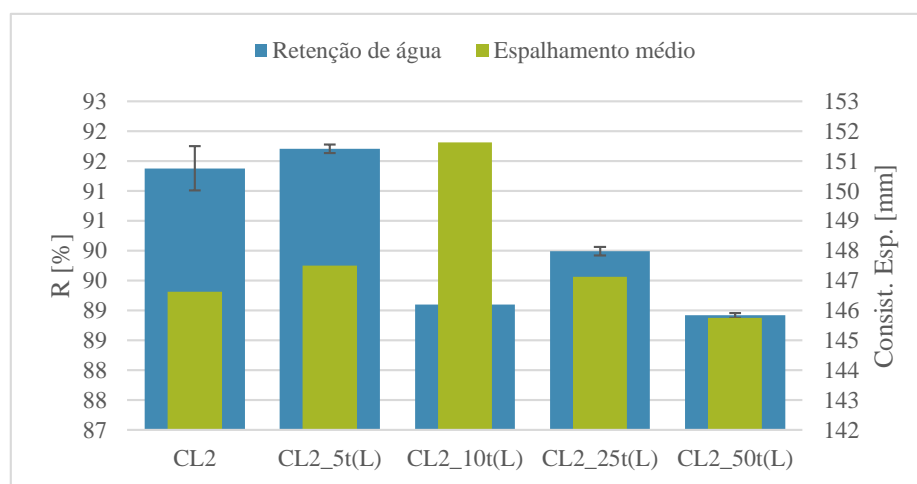


Figura 9.5 – Comparação entre a retenção de água e a consistência por espalhamento

Comparando a retenção de água com o espalhamento obtido (Figura 9.5) verifica-se que para 5% de terra, ambos os parâmetros aumentam em relação à argamassa padrão. Para 10% de terra, há um elevado aumento do espalhamento, enquanto a retenção de água diminui consideravelmente. Quando se aumenta a percentagem de terra para 25%, o espalhamento diminui enquanto a retenção de água é mais elevada. A utilização de 50% de terra implica uma diminuição de ambos os parâmetros. Do mesmo modo que a tendência verificada no ensaio do espalhamento segue a mesma tendência no ensaio do teor de ar (excetuando a argamassa com 50% de terra), esta análise é comparável à análise entre a retenção de água e o teor de ar. A ressalva ocorre apenas para 50% terra onde, apesar do espalhamento e da retenção de água diminuírem, o teor de ar aumenta.

Relacionando a retenção de água e a relação água/terra (Figura 9.6), observa-se que, à medida que a relação água/terra diminui (com o aumento da percentagem de terra), a retenção de água também diminui, com exceção da argamassa com 25% de terra, onde a retenção de água é superior. Quanto mais fino é o material, maior a sua capacidade de absorver água e manter a água absorvida. A introdução de terra em vez de cal implica uma menor capacidade de retenção de água.

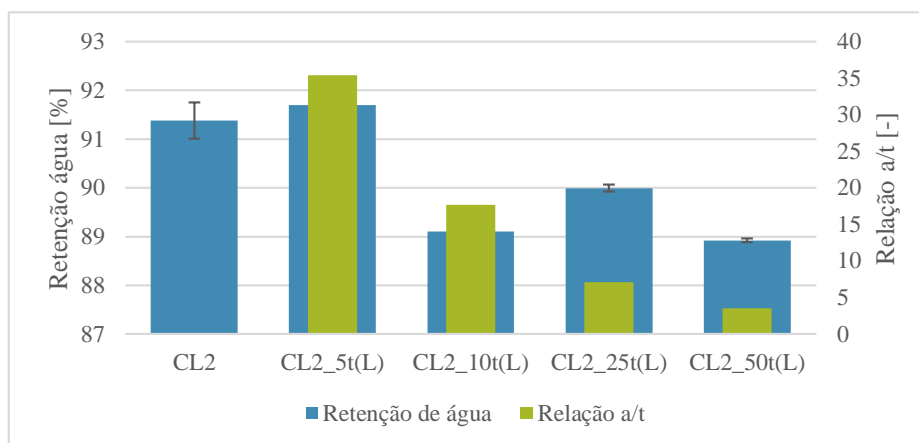


Figura 9.6 – Comparação entre a retenção de água e a relação a/t

9.3. Comparação de resultados no estado endurecido

O ensaio de **dureza superficial** na argamassa padrão (CL2) aplicada no suporte de tijolo teve resultados na ordem dos $55,10 \pm 8,85$ graus Shore A, aos 28 dias. No trabalho realizado em paralelo pela colega Inês Dias (Dias, 2013), a gama de valores para esta argamassa foi de $64,10 \pm 7,11$ graus Shore A; neste caso trata-se da argamassa CL3 (traço volumétrico 1:3 de cal aérea e a mesma mistura de areias). Num estudo realizado a uma argamassa com a mesma areia e cal mas de traço volumétrico 1:4 (Pascoal, 2012), a gama de valores foi $72,5 \pm 1,9$ graus Shore A. Mesmo comparando apenas as respectivas argamassas de referência, observa-se aqui um aumento da dureza superficial quando o traço se revela mais fraco (menor quantidade de ligante), o que não seria expetável. Contudo, a argamassa CL2_50t(L) apresenta valores que se aproximam dos valores para o traço 1:3 ($67,30 \pm 9,66$ graus Shore A), ou seja, a substituição de 50% do ligante (CL) por terra torna esta argamassa de traço 1:2 parecida com a argamassa padrão de traço 1:3 em termos de dureza superficial.

Aos 90 dias os resultados foram na ordem dos $65,70 \pm 9,23$ graus Shore A para a argamassa de referência (CL2). No trabalho realizado em paralelo pela colega Inês Dias (Dias, 2013) com argamassa ao traço 1:3, a gama de valores obtida para esta argamassa foi agora de $60,10 \pm 7,11$ graus Shore A. O traço volumétrico de 1:4 (Pascoal, 2012) obteve, à mesma idade, os valores $74,2 \pm 2,1$ graus Shore A. A relação que se observava entre os diferentes traços aos 28 dias já não se observa para os 90 dias. Os valores do traço estudado, 1:2, encontram-se agora entre os valores do traço 1:3 e 1:4. No entanto, os ensaios foram realizados por operadores diferentes e, como referido anteriormente, os pontos de escolha para realização do ensaio podem ter muita influência.

Os resultados aos 90 dias das argamassas aplicadas no murete de taipa foram em média e desvio-padrão de $62,8 \pm 7,8$ graus Shore A para a argamassa de referência e $70,0 \pm 20,5$ graus Shore A para a argamassa com 25% de terra. Os desvios-padrão são bastante elevados e talvez se devesse ter analisado um maior número de pontos, já que se trata também de uma área maior em comparação com a argamassa aplicada no suporte de tijolo, o que não foi possível devido ao prazo de empréstimo do equipamento. Ainda assim os valores estão próximos dos valores obtidos com as argamassas aplicadas em suporte de tijolo.

A **condutibilidade térmica** destas argamassas, aplicadas num suporte de tijolo, tomou valores semelhantes (embora superiores: $0,49 \pm 0,11$ W/m.K aos 28 dias e $0,51 \pm 0,13$ W/m.K aos 90 dias de cura) por exemplo a revestimentos de placas de gesso cartonado (0,25 W/m.K) e ao estuque tradicional (0,40 m.K), mas inferiores a um reboco exterior comum (1,3 W/m.K) ou comparativamente a argamassas e rebocos de cal aérea e areia ou de argamassa bastarda (0,8 W/m.K) (Henriques, 2011; Pina dos Santos & Matias, 2006). À medida que o tempo de cura aumenta, a condutibilidade térmica também aumenta.

A **condutibilidade térmica** dos provetes prismáticos tomou valores semelhantes aos obtidos por Dias (2013) com argamassa ao traço 1:3. Há no entanto ligeiras variações. Comparando as argamassas de referência CL2 e CL3, a argamassa CL2 obteve um resultado inferior à argamassa CL3. Já relativamente às argamassas com introduções de terra, os resultados obtidos para as argamassas de traço volumétrico 1:3 foram sempre inferiores aos obtidos pelas argamassas de traço volumétrico 1:2. Contudo, as diferenças são muito reduzidas, na ordem dos 0,1 W/m.K.

Comparando as condutibilidades térmicas obtidas nas diferentes aplicações (Figura 9.7), com as devidas ressalvas, observa-se que as linhas de tendência são semelhantes em todas as argamassas, com exceção da argamassa com 25% de terra. Apesar de em cada ensaio existirem algumas condicionantes difíceis de respeitar para tornar o ensaio mais claro, consegue-se observar que o comportamento entre as diferentes argamassas é o mesmo, quer aplicado ao suporte de tijolo, quer em provetes prismáticos.

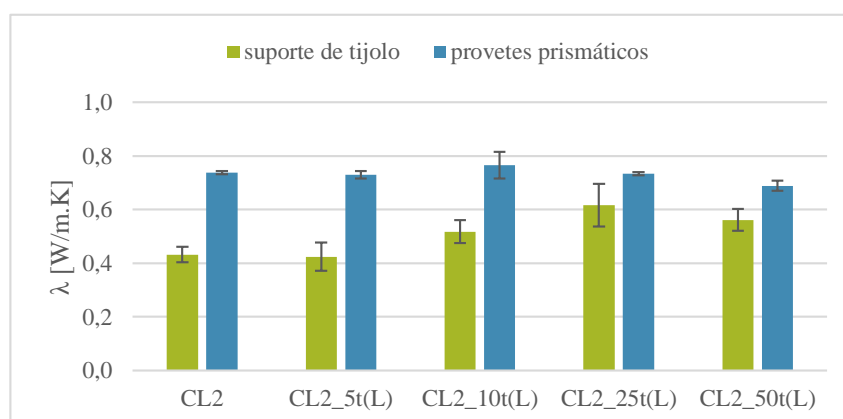


Figura 9.7 – Condutibilidade térmica das argamassas aos 90 dias sobre tijolo e em provetes prismáticos

À medida que o tempo de cura aumenta, os resultados da **velocidade de propagação dos ultrassons** diminui, uma vez que o tempo de atravessamento pelos ultrassons aumenta. A argamassa estando mais “seca”, evidencia mais vazios e irregularidades no interior, o que pode influenciar a passagem dos ultrassons. A crescente substituição de terra implica também uma diminuição da velocidade, aos 90 dias de cura. Comparativamente às argamassas de traço volumétrico 1:3 estudadas por Dias (2013), os valores encontram-se dentro da mesma ordem de grandeza aos 28 dias e aos 90. Mais concretamente os resultados da argamassa com 10% de terra como substituição parcial do ligante

demonstraram resultados semelhantes à introdução de 10% de terra como substituição parcial do agregado fino. Dias (2013) obteve 1437 m/s aos 28 dias e 942 m/s aos 90 dias, comparativamente com o presente estudo, onde se registram valores de 1345 m/s e 918 m/s.

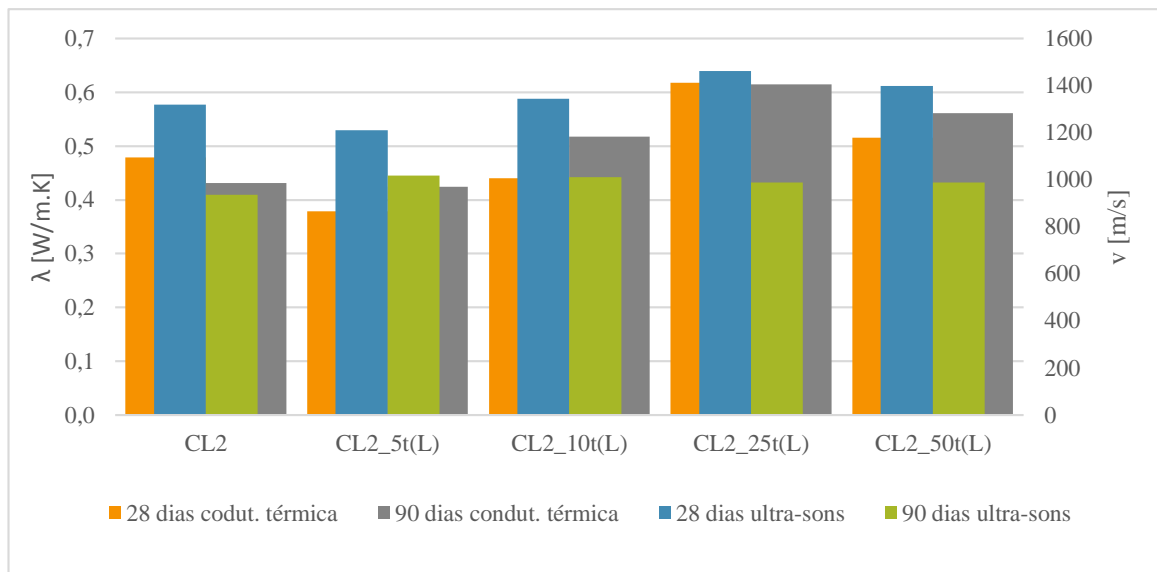


Figura 9.8 – Condutibilidade térmica e a velocidade de propagação dos ultrassons aos 28 e 90 dias

A comparação entre a velocidade de ultrassons e a condutibilidade térmica encontra-se na Figura 9.8. Aos 28 dias a linha de tendência seguida pela condutibilidade térmica é a mesma que a linha seguida pelos ultrassons, ou seja, quando um dos parâmetros cresce o outro também cresce e vice-versa. Aos 90 dias esta relação ocorre inversamente: quando um dos parâmetros cresce o outro decresce, com exceção da argamassa com 50% de terra em que ambos os parâmetros decrescem. Em relação à comparação entre as idades verifica-se que, enquanto por um lado a condutibilidade térmica aumenta entre os 28 e 90 dias (exceto a argamassa de referência), por outro lado a velocidade de propagação dos ultrassons diminui entre as duas idades.

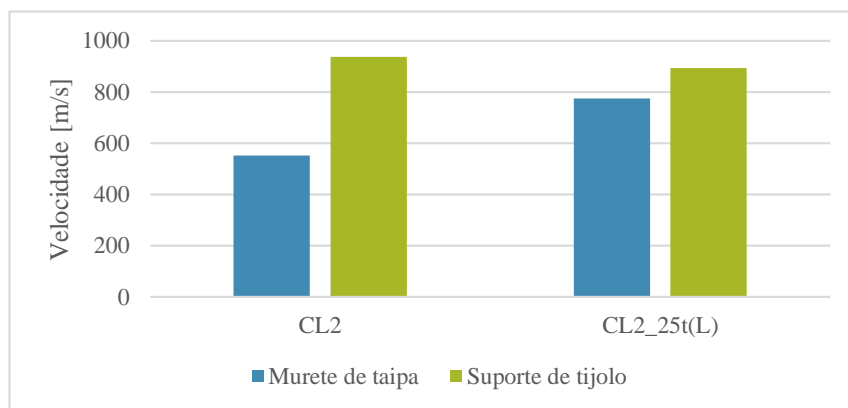


Figura 9.9 – Velocidades de propagação dos ultrassons do reboco no murete e da argamassa sobre tijolo, aos 90 dias

Na Figura 9.9 observa-se que a tendência é a mesma, quer na aplicação de argamassa sobre o suporte de tijolo, quer na aplicação de reboco no murete de taipa. A terra aumenta a compacidade da argamassa e permite a passagem mais rápida dos ultrassons. Na argamassa no suporte de tijolo os valores são mais elevados do que no reboco aplicado no murete, o que se pode dever às diferentes condições de cura a que estiveram sujeitos, e também ao comportamento entre a argamassa e o suporte, nomeadamente em termos de absorção de água no estado fresco. O facto de a velocidade de propagação dos ultrassons ser superior na argamassa ensaiada em suporte de tijolo e contrariar a porosidade aberta por porosimetria de mercúrio (que é menor no suporte de tijolo) pode indicar a presença de microfissuração.

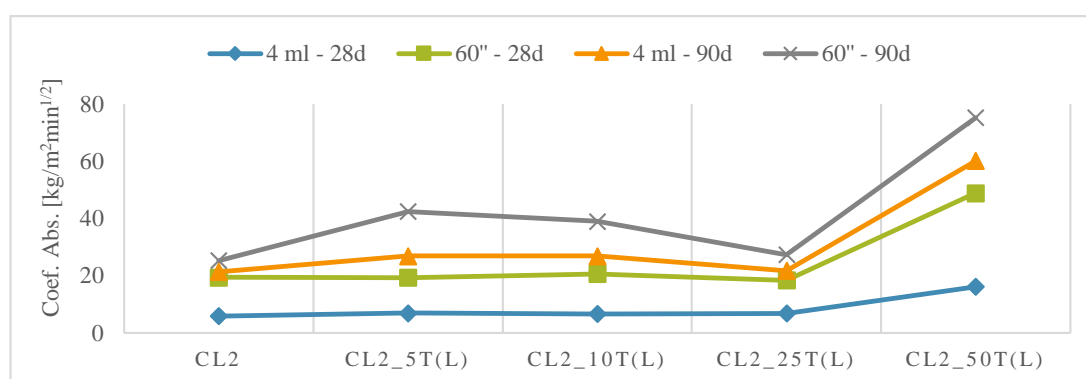


Figura 9.10 – Coeficientes de absorção de água pelos tubos de Karsten (28 e 90 dias)

A **absorção de água sob baixa pressão**, efetuada com recurso aos tubos de Karsten, mostrou uma relação entre os coeficientes de absorção inicial (até aos 4 ml) e total (ao fim de 60 minutos). É possível observar na Figura 9.10 que, aos 28 dias, os coeficientes seguem a mesma tendência, notando-se um aumento do coeficiente de absorção total da argamassa com 50% de terra em comparação ao inicial. Aos 90 dias verifica-se que o coeficiente de absorção inicial segue a tendência e a gama de valores do coeficiente de absorção total aos 28 dias. O coeficiente de absorção total aos 90 dias ajuda-nos a perceber que as argamassas que melhor se comportam à absorção de água sob baixa pressão são a argamassa padrão e a argamassa com 25% de terra. Todos os coeficientes de absorção fundamentam que a argamassa com 50% de terra tem um mau comportamento à água.

Também no estudo realizado por Dias (2013) a relação entre os coeficientes de absorção de água totais segue a mesma tendência às duas idades, sendo os valores aos 90 dias superiores. O coeficiente de absorção total da argamassa de referência é inferior na argamassa de traço 1:3.

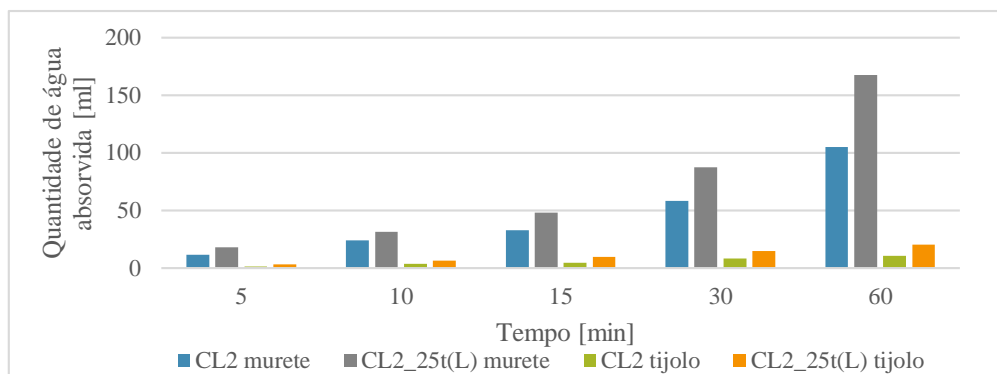


Figura 9.11 – Absorção de água sob baixa pressão do revestimento sobre tijolo e do reboco no murete, aos 90 dias

Comparando os resultados obtidos entre a argamassa aplicada no suporte de tijolo e o reboco de argamassa aplicada no murete (Figura 9.11), verificam-se diferenças substanciais, ainda que à mesma idade. A argamassa com 25% de terra absorve sempre mais água do que a argamassa de referência em cada uma das aplicações. Os valores são muito superiores no reboco aplicado ao murete de taipa, o que pode estar relacionado, em primeiro lugar, com o facto de o suporte de taipa absorver uma maior quantidade de água da argamassa no estado fresco, o que pode influenciar a retração da argamassa e a existência de microfissuração no reboco durante a cura; em segundo lugar, as condições de cura foram totalmente diferentes, sendo uma em ambiente controlado e a outra totalmente exposta às condições ambientais, com muitas alterações entre chuva, períodos de secagem, temperaturas altas e baixas. No entanto, deste ponto de vista a argamassa com 25% de terra apresenta um comportamento desvantajoso em relação à argamassa de referência.

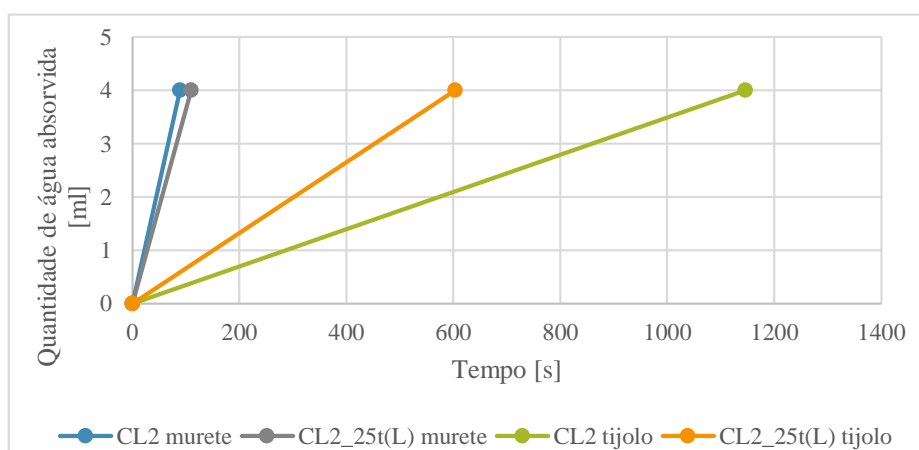


Figura 9.12 – Período de tempo de absorção de 4 ml de água sob baixa pressão pelo revestimento sobre tijolo e o reboco do murete, aos 90 dias

Na Figura 9.12 relaciona-se o tempo de absorção inicial de água (4ml) entre a argamassa aplicada no tijolo e a argamassa aplicada no murete de taipa. Tal como referido anteriormente, as diferenças de valores entre as diferentes aplicações devem-se a determinados fatores. Neste caso, a argamassa com 25% de terra é praticamente idêntica à argamassa de referência, quando se trata do reboco ao murete de taipa. No caso do suporte de tijolo, a argamassa de cal aérea é novamente vantajosa

relativamente à argamassa com terra. Tendo em conta que o murete retrata uma situação real de suporte de terra e de um modo geral bastante absorvente, pode dizer-se que a argamassa com terra traz vantagens relativamente à absorção inicial de água, comparativamente com a argamassa de referência.

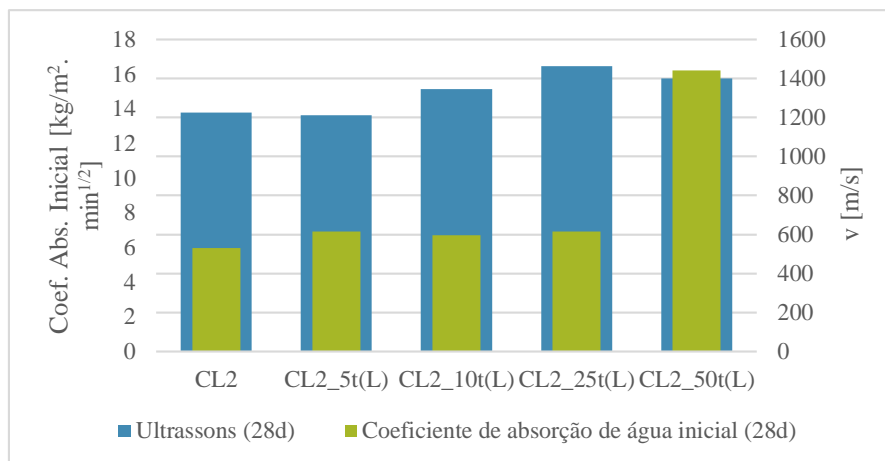


Figura 9.13 – Coeficiente de absorção de água inicial e velocidade de propagação dos ultrassons (28 dias da argamassa no tijolo)

Aos 28 dias, talvez devido à argamassa se encontrar ainda pouco carbonatada, observa-se que o coeficiente de absorção de água inicial é aproximadamente constante, e a velocidade de propagação dos ultrassons sofre uma ligeira subida para todas as argamassas (com exceção da argamassa com 50% de terra cujo coeficiente de absorção é muito elevado e em que a velocidade de propagação dos ultrassons sofre um ligeiro decréscimo) (Figura 9.13).

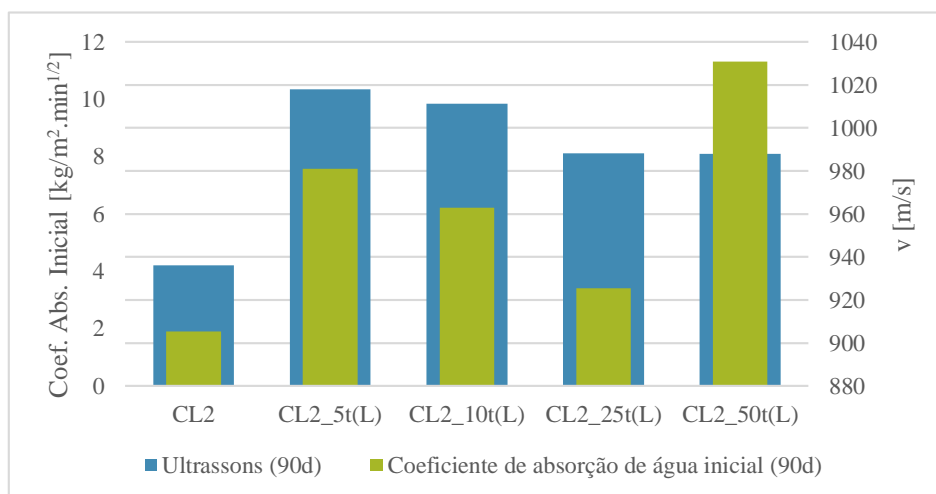


Figura 9.14 – Coeficiente de absorção inicial e velocidade de propagação dos ultrassons (90 dias da argamassa no tijolo)

Aos 90 dias, com a argamassa mais seca, verifica-se que a argamassa de referência possui um coeficiente de absorção de água inicial baixo e a velocidade de propagação dos ultrassons é elevada. Este facto pode dever-se à baixa microfissuração da argamassa e a uma argamassa compacta, que permite a propagação rápida dos ultrassons, ao mesmo tempo que não a deixa absorver muita água. Quando se substitui 5% de terra, o coeficiente de absorção inicial sofre um aumento, com o aumento da velocidade dos ultrassons. Para 10% e 25% de terra o coeficiente de absorção inicial diminui, bem como a velocidade de ultrassons, ou seja, a introdução de pequenas quantidades de terra faz diminuir consecutivamente o coeficiente de absorção de água inicial mas, ao mesmo tempo, reduz a velocidade dos ultrassons, o que indica menor compactidade da argamassa. A argamassa com 50% de terra é novamente a que absorve mais quantidade de água, mas o aumento da velocidade de ultrassons é muito ligeiro (Figura 9.14).

O **módulo de elasticidade dinâmico** de uma argamassa de terra reduz com a adição de pequenas quantidades (5%) de cal aérea e de cal e fibras segundo Gomes *et al.* (2012d), mas o aumento destas quantidades (10% e 15% de cal, com ou sem fibras) faz aumentar este parâmetro, apesar de ser sempre inferior à argamassa só de terra. Contudo, como seria expectável, os valores de E_d obtidos em argamassas de terra com baixas quantidades de cal são bastante inferiores aos valores obtidos no presente estudo. As argamassas estudadas com incorporação parcial de terra como ligante mostram módulos de elasticidade dinâmico admissíveis para aplicações como reboco exterior, interior e também para refechamento de juntas de edifícios antigos ou com características similares (como poderá ser o caso de paredes de terra), tendo em conta o quadro proposto por Veiga *et al.* (2010), ao contrário das argamassas de terra com baixa incorporação de cal. Comparativamente aos resultados obtidos por Branco (2013) para a argamassa de referência de cal aérea ao traço 1:2 obtiveram-se valores próximos (3007 MPa).

Alguns resultados das **resistências à tração por flexão e à compressão** também se enquadram nos valores propostos por Veiga *et al.* (2010). Todas as argamassas cumprem os requisitos de resistência à tração para aplicação em rebocos interiores e exteriores; no entanto, comparando com a gama dessa publicação, nenhuma delas se adequa para refechamento de juntas. No caso das resistências à compressão, a argamassa de referência e as argamassas com 5% e 10% de terra revelaram-se adequadas para aplicação como reboco interior e exterior, ao contrário das argamassas de 25% e 50% de terra. Mais uma vez verifica-se que as resistências das argamassas estudadas não se adequam a refechamento de juntas. No entanto, os valores não se encontram muito afastados e a gama é apenas indicativa e não “fechada”. As argamassas só de terra do estudo de Gomes *et al.* (2012b; 2012d) praticamente não cumprem estes requisitos, excetuando a resistência à compressão da argamassa só de terra, da argamassa de terra com fibras e da argamassa de terra com 15% de cal aérea e fibras. Na presente dissertação as argamassas com 5% e 10% apresentam assim, e como seria expectável, em virtude de uma maior constituição em ligante cal, melhores características mecânicas, e apropriadas para rebocos exteriores e interiores de edifícios antigos, sendo que a argamassa que traz vantagens com resistências superiores à argamassa de referência corresponde a 10% de substituição de terra.

Em comparação com as argamassas estudadas por Branco (2013) aos 90 dias, os resultados de resistência à compressão e à tração da argamassa de referência (ao traço 1:2, igual à do presente estudo) são bastante semelhantes, tal como era de esperar.

Comparativamente com uma outra argamassa de traço volumétrico 1:2, de cal aérea e areia de rio (sujeita a uma cura diferente e ensaiada aos 60 dias e posteriormente aos 90 dias) (Faria, 2003; Faria, 2008), constata-se que a argamassa padrão obteve um módulo de elasticidade superior em relação aos 60 e 90 dias (talvez pela diferença entre agregados) e resistências à compressão e à tração muito semelhantes. Observa-se que a argamassa com 50% de terra obteve resistências, tanto à tração como à compressão, que se aproximam da argamassa de cal aérea com o mesmo agregado, de traço volumétrico 1:3 (Dias, 2013). Pode dizer-se que esta quantidade de terra como ligante enfraquece a argamassa, aproximando-a de uma argamassa de traço volumétrico 1:3, com menores características mecânicas.

Apesar de indiretamente comparável, mas tendo em conta que se tratam de argamassas de terra, os resultados obtidos por Fernandes *et al.* (2012) para argamassas onde apenas se utiliza cal aérea e terra nos traços volumétricos 1:3 e 1:4 (CL:terra argilosa) são superiores no que se refere às resistências à compressão e inferiores quando se trata de resistências à tração.

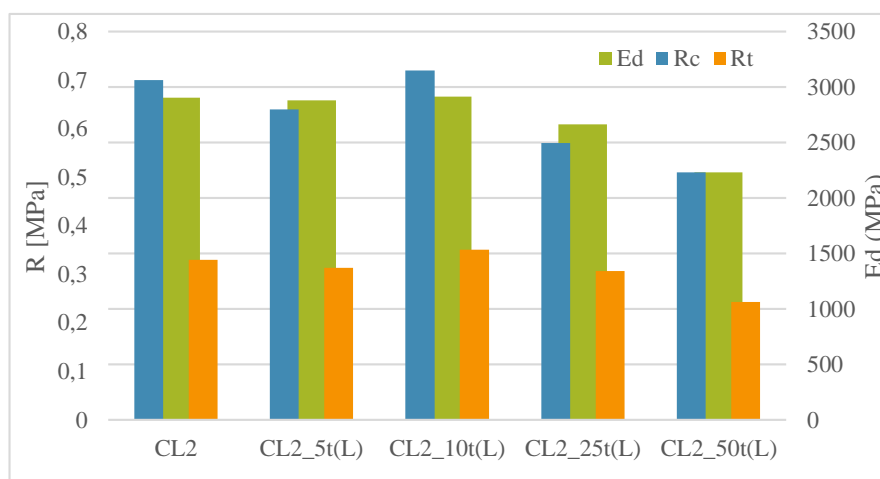


Figura 9.15 – Resistências à compressão e tração, e módulo de elasticidade dinâmico

Comparando os três parâmetros referidos nos parágrafos anteriores verifica-se que a argamassa CL2_10t(L) consegue uma melhoria nas resistências em relação à argamassa padrão de cal aérea, e um módulo de elasticidade superior, tal como se pode observar na Figura 9.15. Analisar as mesmas argamassas mas com substituições de terra entre os 10% e os 25% poderá ser vantajoso na medida em que se poderá verificar se as características mecânicas sofrem aumentos até uma dada percentagem superior aos 10%, antes de começarem a diminuir.

De acordo com a norma EN 998-1 (CEN, 2010), podem inserir-se as argamassas estudadas dentro da gama de valores referida para a resistência à compressão, ainda que a idades diferentes (considerando os valores a 90 dias, em vez dos 28 dias definidos na norma). Todas as argamassas correspondem à categoria CS I (0,4 N/mm² a 2,5 N/mm²).

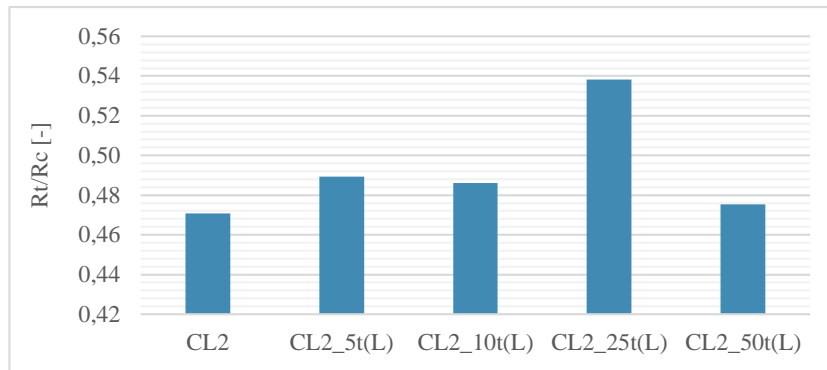


Figura 9.16 – Quociente entre a resistência à tração e à compressão

Quanto mais deformável é a argamassa, maior a relação R_t/R_c e melhor o comportamento da argamassa às tensões criadas, sem afetar o suporte (Faria, 2004). Observa-se na Figura 9.16 que a argamassa mais deformável corresponde à CL2_25t(L) e a menos deformável é a argamassa padrão (CL2). É visível assim que a utilização da terra aumenta a deformabilidade comparativamente à argamassa só de cal aérea, mas salientando-se muito pela positiva a argamassa com 25% de terra. Ainda assim, analisando as resistências mecânicas individualmente de cada argamassa e a relação entre elas, constata-se que a que resulta em melhores comportamentos é a CL2_10t(L).

No caso de uma argamassa ter necessidade de se deformar mas ao mesmo tempo a resistência à tração for baixa, podem surgir fissuras na argamassa aplicada. Segundo Veiga (2005) “*é importante usar argamassas pouco suscetíveis à fendilhação, atuando sobre a sua composição de forma a obter materiais menos rígidos, menos geradores de tensões e mais capazes de absorver as que produzem*”. A suscetibilidade à fendilhação, de certa forma, pode ser avaliada através da relação entre o módulo de elasticidade dinâmico e a resistência à tração, apresentada na Figura 9.17. Observa-se uma suscetibilidade à fendilhação elevada nas argamassas com 5% e 50% de terra, em comparação com a argamassa de referência. Contudo as argamassas com 25% e principalmente com 10% de terra revelam valores baixos relativamente a este parâmetro.

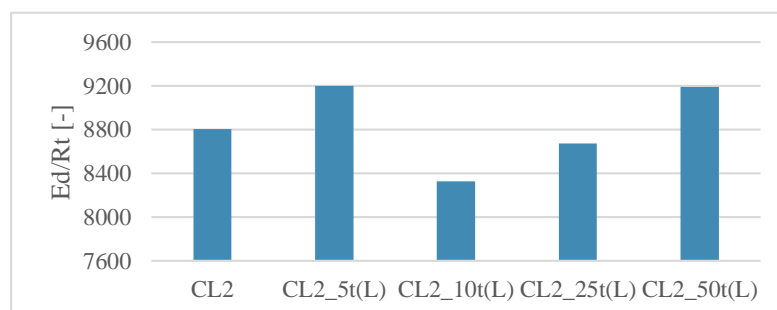


Figura 9.17 – Quociente entre o módulo de elasticidade dinâmico e a resistência à tração

A **porosidade aberta** e a **massa volúmica aparente** relacionam-se inversamente, como foi referido na análise dos resultados individuais (ponto 8.3.4.5).

Também neste caso, comparativamente com uma outra argamassa de cal aérea, mas com areia de rio, de traço volumétrico 1:2 (Faria *et al.*, 2008), os resultados obtidos para a porosidade aberta e para a massa volúmica aparente são inferiores. Isto deve-se à diferença dos agregados e também ao tipo de cura realizada. Relacionando estas argamassas com as argamassas ao traço volumétrico 1:3 estudadas por Dias (2013) observa-se que para 25% de substituição de terra, quer como ligante, quer como agregado fino, os resultados da porosidade aberta são muito idênticos, na ordem dos 30%.

Na Figura 9.18 relaciona-se a porosidade aberta com a resistência à compressão de cada argamassa. Do mesmo modo, relacionando a porosidade aberta com a resistência à tração verificam-se os mesmos aspetos que serão descritos pois, tal como referido anteriormente, o gráfico segue o mesmo andamento que a resistência à compressão. O aumento da porosidade aberta com a introdução de terra traz vantagens na argamassa com 10% de terra, onde a resistência à compressão é mais elevada. Apesar da porosidade aberta ser sempre superior à argamassa de referência para 25% e 50% de terra, nestes casos há um decréscimo na resistência à compressão, não se tornando vantajosa a sua utilização.

Como este ensaio é realizado estando os provetes completamente saturados e possuindo as argilas propriedades particulares no que respeita a absorção de moléculas de água, fica por avaliar de forma mais exaustiva alguma influência que possa advir deste facto.

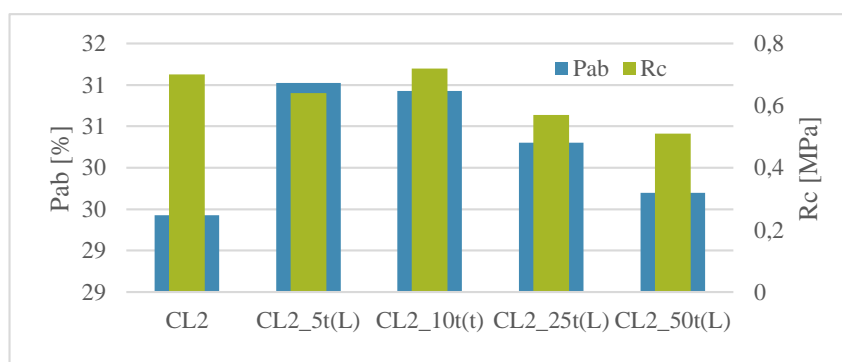


Figura 9.18 – Porosidade aberta e Resistência à compressão

A Figura 9.19 relaciona a porosidade aberta pelo método hidrostático com a porosimetria de mercúrio. Observa-se que a quantidade de poros de menor dimensão diminui com a introdução de 5% de terra, ao contrário da quantidade de poros de maior dimensão, que aumenta. A porosidade aberta aumenta também com 5% de terra. Com 10% de terra a quantidade de poros de menor dimensão aumenta, aproximando-se da argamassa de referência e a quantidade de poros de maior dimensão diminui, aproximando-se também da argamassa de referência. Para 25% e 50% de terra, a quantidade de poros de menores dimensões diminui sucessivamente, assim como a porosidade aberta, enquanto que a quantidade de poros de maiores dimensões aumenta. Nestas três últimas argamassas, em simultâneo com a diminuição da porosidade aberta e dos poros de menores dimensões, ocorre também a diminuição das resistências mecânicas (Figura 9.18). Ou seja, o aumento da quantidade de poros de maiores dimensões resultante da incorporação de quantidades elevadas de terra, implica uma redução das resistências mecânicas, verificando-se mais uma vez que a argamassa com 10% de terra constitui uma mistura com melhores características.

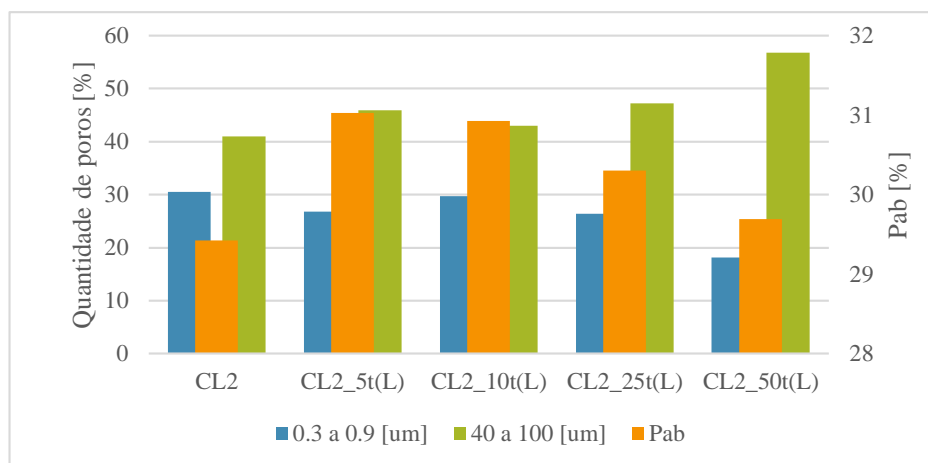


Figura 9.19 – Porosidade aberta pelo método hidrostático e a quantidade de poros de maior dimensão por porosimetria de mercúrio

O ensaio de **capilaridade** demonstrou que as argamassas com introdução de terra em geral funcionam bem relativamente à absorção capilar. O valor do coeficiente de capilaridade obtido para a argamassa de referência, $3,78 \text{ kg/m}^2\text{min}^{1/2}$ ou $0,49 \text{ kg/m}^2\text{s}^{1/2}$, encontra-se na mesma gama do intervalo obtido por Faria *et al.* (2008) para uma argamassa com o mesmo traço volumétrico mas agregados e condições de cura diferentes, ensaiada aos 60 e 180 dias, com registos de $0,43 \text{ kg/m}^2\text{s}^{1/2}$ e $0,39 \text{ kg/m}^2\text{s}^{1/2}$, respetivamente. O mesmo acontece com o valor assintótico $19,68 \text{ kg/m}^2$ que se encontra entre os valores medidos aos 60 e 90 dias, de $20,7 \text{ kg/m}^2$ e $18,8 \text{ kg/m}^2$.

Comparativamente às argamassas de terra (Gomes *et al.*, 2012b) os coeficientes de capilaridade obtidos para todas as argamassas aproximam-se dos valores do estudo para 10% e 15% de cal aérea e para 15% de cal aérea e fibras. As argamassas só de terra e com 5% de cal adicionada têm valores bastante inferiores aos obtidos. Portanto, introduzir 10% e 15% de cal aérea nas argamassas de terra ou substituir percentagens de cal aérea por terra resulta em comportamentos semelhantes relativamente à capilaridade.

No estudo de Dias (2013) também se obteve um coeficiente de capilaridade inferior para a argamassa com 10% de terra em substituição do agregado fino; portanto esta percentagem de terra traz vantagens nas duas vertentes estudadas. É interessante de observar que o valor assintótico foi semelhante em ambas as argamassas com 25% de terra. O coeficiente de capilaridade da argamassa de traço 1:3 é superior ao da argamassa de referência de traço 1:2.

Os resultados obtidos enquadram-se nos valores definidos na norma EN 998-1 (CEN, 2010) relativamente ao coeficiente de capilaridade, encontrando-se todos na classe W0.

O ensaio de **secagem** demonstrou que, no geral, as argamassas com introdução de terra são competitivas em relação à argamassa de referência. As curvas são praticamente coincidentes, sendo que a única que se afasta ligeiramente corresponde à argamassa com 50% de terra. O índice de secagem de 0,17 [-] para todas as argamassas estudadas encontra-se dentro da gama de valores obtidos por Gomes *et al.* (2012b) para argamassas de terra com incorporação de 10% e 15% de cal aérea e com a incorporação de 5%, 10% e 15% de cal aérea e fibras.

Comparativamente ao estudo realizado por Dias (2013) com argamassas 1:3 observou-se que o índice de secagem das argamassas é sempre inferior às argamassas do presente estudo. Já a taxa de secagem dessas argamassas é, na maioria das vezes, superior às argamassas estudadas. Tal como nos parâmetros já abordados anteriormente, estas diferenças não são muito significativas. No entanto permitem avaliar com mais precisão as argamassas com melhores comportamentos.

Através da Figura 9.20 verifica-se que o coeficiente de capilaridade e a taxa de secagem seguem a mesma tendência, ou seja, a absorção de água inicial e a secagem inicial, apesar de ocorrerem a velocidades diferentes, ocorrem na mesma proporção entre as diferentes argamassas. Tal situação significa que as argamassas que absorvem água por ascensão capilar mais lentamente também a libertam mais lentamente no início da secagem.

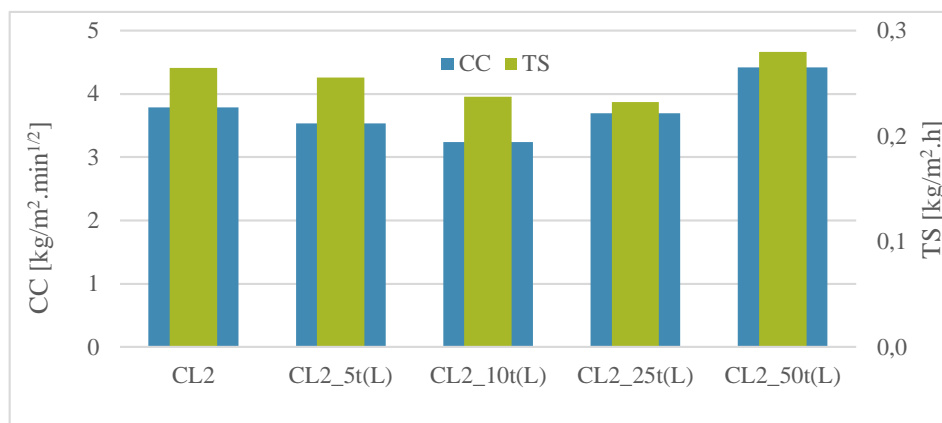


Figura 9.20 – Coeficiente de capilaridade e a Taxa de secagem

Na Figura 9.21 observa-se que, entre a argamassa de referência, a argamassa com 5% e com 10% de terra, à medida que o valor assintótico aumenta, o índice de secagem diminui; isto quer dizer que, quanto maior quantidade total de água é absorvida pela argamassa por ascensão capilar, mais rapidamente se vai atingindo a secagem total. Com 25% de terra, a argamassa absorve mais água no limite mas também tem menos facilidade de secar completamente; para 50% de terra a diminuição do valor assintótico implica também a diminuição do índice de secagem, indicando ser esta a argamassa que absorve menor quantidade total e a liberta totalmente com maior facilidade.



Figura 9.21 – Valor assintótico e o Índice de secagem

A comparação entre a porosidade aberta pelo método hidrostático e o coeficiente de capilaridade apresenta-se na Figura 9.22. Observa-se que os valores mais elevados de CC ocorrem para as argamassas com menor porosidade aberta (referência e 50% de terra). As argamassas com 5%, 10% e 25% de terra sofrem uma ligeira diminuição do valor da porosidade aberta entre elas; no entanto não há variações significativas do coeficiente de capilaridade.

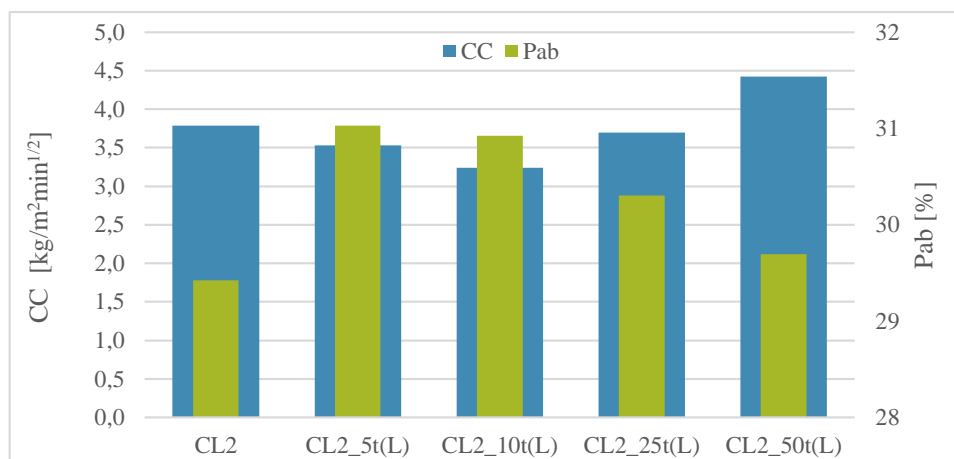


Figura 9.22 – Coeficiente de capilaridade e Porosidade aberta ou total

A comparação entre a porosidade aberta pelo método hidrostático e o valor assintótico apresenta-se na Figura 9.23. Nas argamassas de referência e com 50% de terra, baixa porosidade aberta implica também baixo valor assintótico. Para as percentagens de 5%, 10% e 25%, à medida que há uma diminuição da porosidade aberta, há um incremento no valor assintótico.

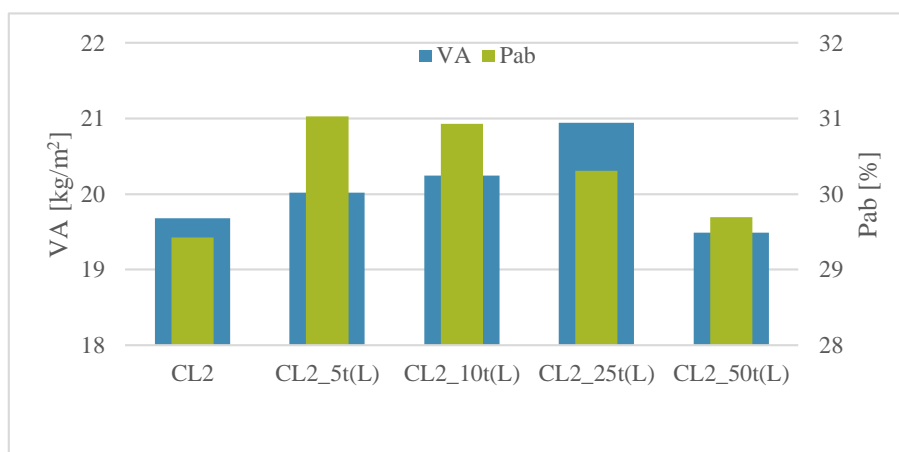


Figura 9.23 – Valor assintótico e Porosidade aberta ou total

Na Figura 9.24 relaciona-se o coeficiente de capilaridade com a quantidade de poros de maior ou menor dimensão, obtidos no ensaio de porosimetria de mercúrio. O coeficiente de capilaridade segue a mesma linha de tendência que a quantidade de poros de maior dimensão e a tendência inversa à observada para a quantidade de poros de menor dimensão para todas as argamassas com incorporação de terra. Quanto menor a quantidade de poros da gama capilar, maior o coeficiente de capilaridade.

De acordo com Rato (2006), a porosimetria pode estar relacionada com a absorção capilar inicial, sabendo que o “caminho” percorrido pelo mercúrio será à partida também o “caminho” seguido pela água.

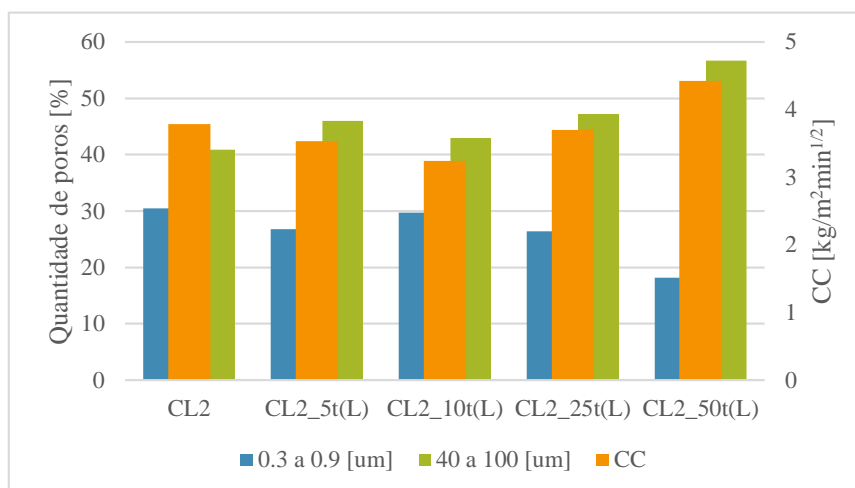


Figura 9.24 – Coeficiente de capilaridade e dimensão dos poros das argamassas nos provetes prismáticos

A porosidade aberta acompanha a taxa de secagem para as percentagens de 5%, 10% e 25%; à medida que um dos parâmetros reduz, o outro parâmetro também reduz. Nessas argamassas quanto menor a porosidade aberta, menor a taxa de secagem. As exceções são as argamassas de referência e com 50% de terra incorporada. Para estas duas argamassas, quanto menor a porosidade aberta, maior a taxa de secagem (Figura 9.25).



Figura 9.25 – Taxa de secagem e Porosidade aberta pelo método hidrostático

O índice de secagem diminui com a diminuição da porosidade aberta, nas argamassas com incorporação de terra, com exceção da argamassa com 25% de terra, onde o índice de secagem aumenta. A argamassa de referência obteve o índice de secagem mais elevado para o valor mais baixo de porosidade aberta pelo método hidrostático (Figura 9.26).

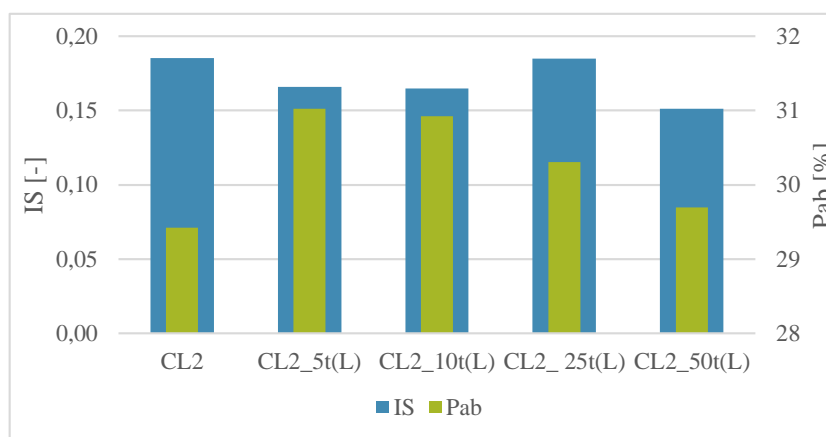


Figura 9.26 – Índice de secagem e Porosidade aberta pelo método hidrostático

A Figura 9.27 relaciona a porosimetria com a taxa de secagem. Tal como visto anteriormente para o coeficiente de capilaridade, também para este parâmetro observa-se que as linhas de tendência da quantidade de poros de maior dimensão e da taxa de secagem são as mesmas, inversamente à quantidade de poros de menor dimensão – nas argamassas com incorporação de terra. Entre as argamassas com 10%, 25% e 50%, quanto menor a porosidade aberta, e quanto maior a quantidade de poros de maior dimensão, maior o coeficiente de capilaridade e a taxa de secagem.

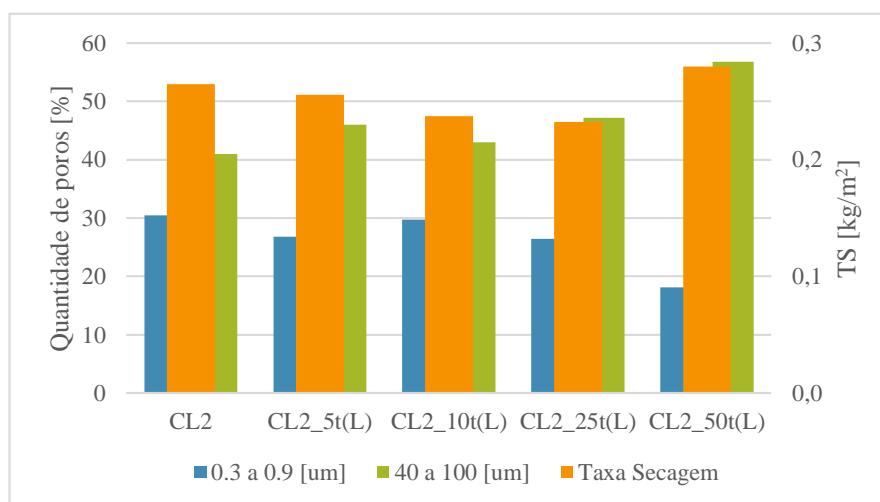


Figura 9.27 – Taxa de secagem e Porosimetria dos provetes prismáticos

O ensaio de **resistência aos sulfatos** mostrou uma melhoria para a argamassa com 10% de terra. A argamassa de referência perdeu, ao fim de 25 ciclos, 48,40 % da massa inicial. Comparativamente ao estudo de Faria (2009), ao 8º ciclo a argamassa 1:2 analisada perdeu 100% da massa. No entanto a solução de sulfatos continha a percentagem definida na norma (6%), e daí a degradação seja mais rápida. Note-se também que as areias são diferentes e que o ensaio de porosidade aberta obteve um valor ligeiramente superior.

Comparativamente à argamassa de referência de traço volumétrico 1:3 do estudo realizado por Dias (2013), a perda de massa neste caso foi inferior (42,32 %).

A Figura 9.28 mostra a comparação entre a porosidade aberta pelo método hidrostático e a perda de massa por 25 ciclos de ataque dos sulfatos.

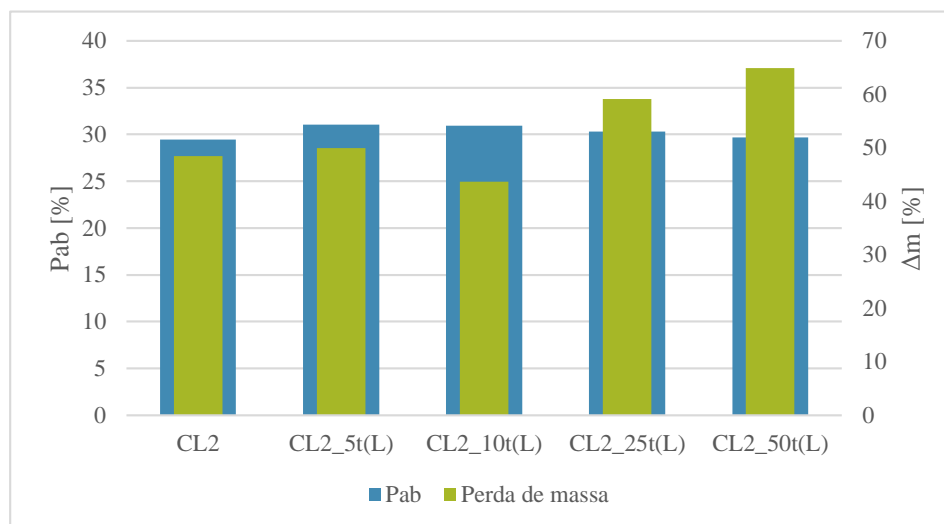


Figura 9.28 – Porosidade aberta pelo método hidrostático e perda de massa por 25 ciclos de ataque por sulfatos

Na Figura 9.28 observa-se que quando se introduz uma pequena percentagem de terra, 5%, tanto a porosidade aberta, como a perda de massa aumentam. Quando se adiciona 10% de terra, ambos os parâmetros diminuem. Para as restantes percentagens de terra, a perda de massa aumenta com a incorporação de terra e a porosidade aberta diminui.

A Figura 9.29 mostra a comparação entre a perda de massa aos 25 ciclos de ataque dos sulfatos e a porosimetria das argamassas.

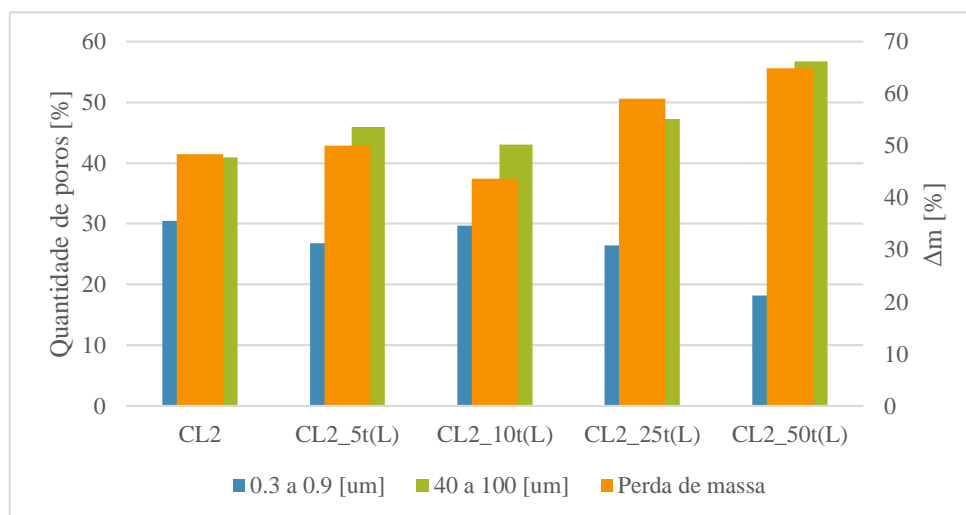


Figura 9.29 – Perda de massa por 25 ciclos de ataque dos sulfatos e a porosimetria das argamassas

Verifica-se que a perda de massa segue a mesma tendência dos poros de maior dimensão e a tendência inversa dos poros de menores dimensões. Quanto maior a quantidade de poros de dimensões entre 40 e 100 μm e quanto menor a quantidade de poros de dimensões entre 0,3 e 0,9 μm , maior a perda de massa ocorrida pelo ataque dos sulfatos.

Na Figuras 9.30 e 9.31 comparam-se os resultados do ensaio de porosimetria das argamassas de referência e com 25% de terra, respectivamente, resultantes da aplicação nos diferentes suportes.

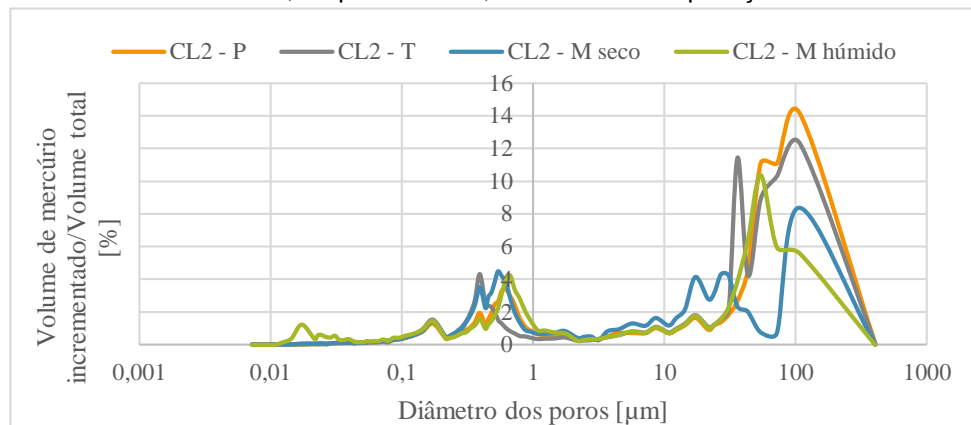


Figura 9.30 – Comparação entre a porosimetria da argamassa CL2, nos diferentes suportes.

Da Figura 9.30 verifica-se que, para a argamassa de referência, a distribuição de poros em relação aos diferentes suportes é bastante variada. Há coerência na quantidade de poros de menor dimensão. As argamassas dos prismas e sobre o tijolo apresentam uma quantidade semelhante de poros de maiores dimensões. No que toca ao reboco de argamassa aplicada no murete de taipa, na zona húmida há uma percentagem de poros de 50 μm , o que não acontece para a zona seca. Há uma percentagem mais elevada de poros de 100 μm na zona seca comparativamente à zona húmida. Deve ter-se em conta que o suporte é um aspeto muito importante no estudo destas argamassas.

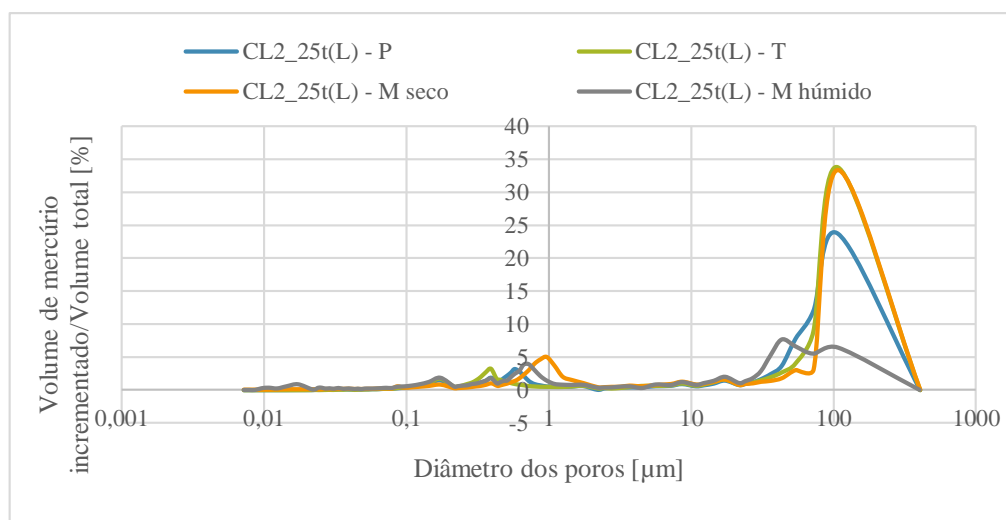


Figura 9.31 – Comparação entre a porosimetria da argamassa com 25% de terra, nos diferentes suportes

Da Figura 9.31 constata-se que os poros de menores dimensões desta argamassa encontram-se entre os 0,1 e 1 μm . Há diferenças mais significativas nos poros de maiores dimensões, sendo que a argamassa sobre o suporte de tijolo e no murete na zona mais seca resultam na mesma distribuição de poros de maior dimensão. Com os prismas há menor percentagem de poros de maior dimensão e no caso do murete em zona húmida, esta percentagem diminui substancialmente. Deve ter-se em atenção a cura, salvaguardar a zona em contacto com o solo e também a mais exposta à ação da chuva.

A porosidade aberta dada pelo ensaio da porosimetria de mercúrio pode ser comparada com a porosidade aberta obtida pelo método hidrostático, na Figura 9.32.

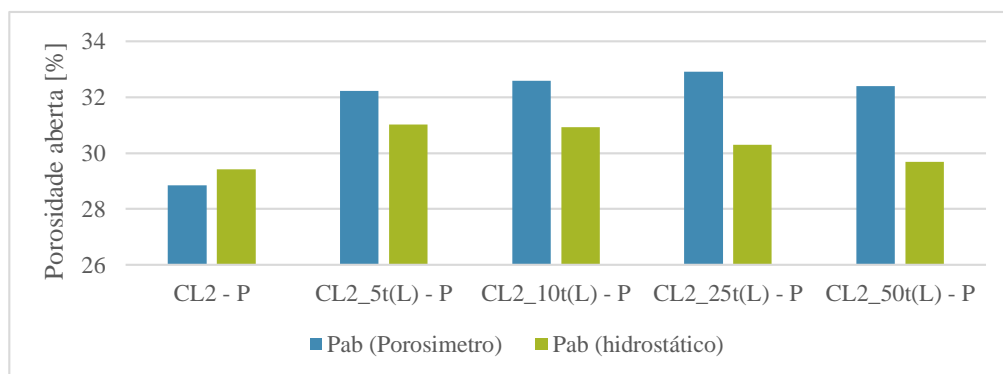


Figura 9.32 – Comparação entre a porosidade aberta medida pelo método hidrostático e pelo porosímetro de mercúrio, das argamassas dos prismas, aos 90 dias

A tendência observada é a mesma e os valores não se afastam muito uns dos outros, pelo que ambos os ensaios mostram resultados plausíveis de análise.

Ao fim de 5 meses de aplicação em reboco sobre o murete verifica-se que os painéis de rebocos constituídos pelas argamassas CL2 e CL2_25t(L) apresentam-se muito pouco fendilhados e com boa aparência estética. Nota-se como ponto negativo, que junto à base do murete o reboco continua bastante húmido devido à ausência de isolamento entre o terreno e o murete.

No Quadro 9.7 encontra-se um quadro resumo dos ensaios realizados e uma avaliação dos resultados das argamassas face à argamassa de referência e face à quantidade de terra introduzida. Este quadro permite interpretar resumidamente os resultados e escolher a argamassa com melhores comportamentos, ainda que, como se verifica neste anexo, não seja fácil escolher apenas uma argamassa. Genericamente as argamassas com 10% e 25% de terra mostram-se interessantes. No estado fresco a argamassa com 25% de terra revelou melhor comportamento. No estado endurecido, aplicada aos tijolos, tanto a argamassa com 10% como com 25% mostraram melhorias face à argamassa de referência. A primeira apresentou melhor condutibilidade térmica aos 28 dias, mas a segunda comportou-se melhor até ao final do ensaio de absorção de água. No estado endurecido, mas para os provetes prismáticos, a argamassa com 10% de terra mostrou melhorias em praticamente todos os ensaios realizados, face à argamassa de referência. A argamassa com 25% de terra mostrou-se também bastante interessante. A aplicação do reboco de argamassa com 25% de terra no murete de taipa é benéfica para todos os aspetos, com exceção da absorção de água, ponto este de elevada importância e que deve ser melhorado. Consideram-se mais válidas as argamassas aplicadas no murete de taipa, embora em condições menos controladas.

Quadro 9.7 – Resumo dos resultados obtidos

	CL2 (referência)	CL2_5t(L)	CL2_10t(L)	CL2_25t(L)	CL2_50t(L)
Espalhamento (mm)	146,6	==	++	++	--
			+	-	-
Massa volúmica (fresco) (kg/m³)	1925,80	==	==	==	==
			=	=	=
Teor de ar (%)	4,25	++	++	++	++
			=	=	+
Retenção de água (%)	91,4	++	--	--	--
			-	+	-
Resumo (estado fresco)	CL2_25t(L)				

	CL2 (referência)	CL2_5t(L)	CL2_10t(L)	CL2_25t(L)	CL2_50t(L)
Dureza superficial (28 dias) (Shore A)	55,1	++	++	++	++
			+	-	+
Dureza superficial (90 dias) (Shore A)	65,7	--	--	--	--
			+	+	-
Condutibilidade térmica, tijolos (28 dias) (W/mK)	0,48	--	--	++	++
			+	+	-
Condutibilidade térmica, tijolos (90 dias) (W/mK)	0,43	==	++	++	++
			+	+	-
Ultrassons (28 dias) (m/s)	1320,31	--	++	++	++
			+	+	-
Ultrassons (90 dias) (m/s)	936,12	--	--	--	--
			-	-	+
Absorção total - tubos de Karsten (28 dias) (kg/m ² min ^{1/2})	13,50	--	++	--	++
			+	-	+
Absorção total - tubos de Karsten (90 dias) (kg/m ² min ^{1/2})	3,91	++	++	++	++
			-	-	+
Absorção inicial - tubos de Karsten (28 dias) (kg/m ² min ^{1/2})	5,98	++	++	++	++
			-	+	+
Absorção inicial - tubos de Karsten (90 dias) (kg/m ² min ^{1/2})	1,90	++	++	++	++
			-	-	+
Resumo (estado endurecido - provetes de tijolo)	CL2_10t(L) ou CL2_25t(L)				

de cal aérea e terra

A influência da terra como ligante

	CL2 (referência)	CL2_5t(L)	CL2_10t(L)	CL2_25t(L)	CL2_50t(L)
Condutibilidade térmica, prismas (90 dias) (W/mK)	0,74	--	++ +	-- -	-- -
Módulo de elasticidade dinâmico (90 dias) (MPa)	2902,00	--	== +	-- -	-- -
Resistência à compressão (90 dias) (MPa)	0,70	--	++ +	-- -	-- -
Resistência à tração (90 dias) (MPa)	0,33	--	++ +	-- -	-- -
Coeficiente de capilaridade (90 dias) (kg/m ² min ^{1/2})	3,78	--	-- -	-- +	++ +
Valor assintótico (90 dias) (kg/m ² min ^{1/2})	19,68	++	++ +	++ +	-- -
Taxa de secagem (90 dias) (kg/m ²)	0,27	--	-- -	-- -	++ +
Índice de secagem (90 dias) (-)	0,19	--	-- -	-- +	-- -
Resistência aos sulfatos (% massa perdida aos 25 ciclos)	51,1	++	-- -	++ +	++ +
Resumo (estado endurecido - provetes prismáticos)	CL2_10t(L)				

	CL2 (referência)		CL2_25t(L)	
Dureza superficial (90 dias) (Shore A)	63		++	
Resistência superficial (90 dias) (graus Vickers VH)	79		++	
Ultrassons (90 dias) (m/s)	551		++	
Absorção total - tubos de Karsten (90 dias) (kg/m ² min ^{1/2})	28,3		++	
Absorção inicial - tubos de Karsten (90 dias) (kg/m ² min ^{1/2})	6,85		--	
Resumo (estado endurecido - provetes em suporte de taipa)	CL2_25t(L)			

Legenda:

++	Aumento em relação à argamassa de referência
+	Aumento em relação à quantidade de terra
==	Mantém-se em relação à referência
=	Mantém-se em relação à quantidade de terra
-	Diminui em relação à quantidade de terra
--	Diminui em relação à argamassa de referência
	Bom
	Indiferente (por se encontrar ainda dentro dos limites admissíveis ou por não haver alteração significativa)
	Mau

10. CONCLUSÕES

10.1. Considerações finais

A presente dissertação iniciou-se com uma abordagem à sustentabilidade e uma contextualização histórica sobre as construções com utilização do material terra, seguida da caracterização dos constituintes utilizados na formulação das argamassas estudadas, bem como os estudos existentes sobre argamassas com cal aérea e terra. As exigências funcionais finalizaram o estado do conhecimento. A etapa experimental permitiu avaliar as características das argamassas no estado fresco e no estado endurecido em três aplicações distintas – prismas, tijolo cerâmico e murete de taipa – principalmente aos 90 dias de cura, com base em normas europeias e procedimentos de ensaio utilizados pela orientadora. Foi avaliada a influência da substituição de cal aérea por diferentes percentagens de terra, em argamassas de traço volumétrico 1:2, submetidas a uma cura em ambiente controlado e com aspersão nos primeiros dias.

Finalizadas as diferentes etapas deste estudo considera-se que os objetivos de contribuir para um melhor conhecimento fundamentado de argamassas mistas de cal aérea e terra foram cumpridos.

Analisando os ensaios às argamassas no estado fresco há um aumento dos valores de espalhamento para 10% e 25% de terra, sem a necessidade de se adicionar mais água, o que demonstra a boa trabalhabilidade destas argamassas. A introdução de terra não influencia a massa volúmica no estado fresco mas aumenta o teor de ar de todas as argamassas em relação à argamassa de referência. A argamassa que retém menos água contém 5% de terra; contudo a argamassa com 25% de terra obteve valores superiores às argamassas com 10% e 50% de terra. A trabalhabilidade e aplicabilidade medidas pelo operador do ensaio de espalhamento foram determinantes na escolha da argamassa com 25% de terra como a argamassa com melhores características no estado fresco face à aplicação em obra e que, por essa razão e tendo em conta os resultados dos ensaios preliminares, foi utilizada para rebocar o murete de taipa.

Quanto aos ensaios realizados às argamassas no estado endurecido aplicadas em suporte de tijolo, os resultados são variados e dificultam a escolha da “melhor” argamassa. A dureza superficial medida pelo durómetro não tem uma grande influência nos resultados, mantendo-se numa gama reduzida de valores, tanto aos 28 como aos 90 dias. A condutibilidade térmica aos 28 dias é influenciada negativamente com a incorporação de 25% e 50% de terra, sendo benéfica a introdução de 5% e 10% de terra. Aos 90 dias também a argamassa com 10% de terra aumenta a condutibilidade térmica, portanto apenas a argamassa com 5% de terra traz vantagens relativamente a este parâmetro. No entanto, e face às espessuras de aplicação em rebocos, esta situação não é muito significativa. O ensaio da velocidade de propagação de ultrassons aos 28 dias resulta em valores mais elevados que a argamassa de referência para todas as percentagens de terra, com exceção da argamassa com 5% de terra. Aos 90 dias há melhorias dos resultados para as argamassas com 10% e 25% de terra. O ensaio de absorção de água pelos tubos de Karsten demonstrou, por vezes, ser dependente do tipo de plasticina estanque utilizada – facto que condicionou a validade de alguns ensaios, que tiveram de ser repetidos.

Mesmo assim, relativamente à absorção dos primeiros 4ml, enquanto que aos 28 dias só a argamassa com 10% de terra mostrava um bom comportamento, aos 90 dias também a argamassa com 25% de terra funciona bem em contacto com a água. Contudo, neste aspeto a argamassa de referência só de cal aérea comporta-se melhor do que as argamassas com terra. Até ao fim do ensaio (1h) verificou-se aos 28 dias que as argamassas com 5% e 25% de terra são vantajosas comparativamente com a argamassa de referência. Já aos 90 dias os valores do coeficiente de absorção total são superiores ao da argamassa de referência mas ainda assim, 10% e 25% de terra fazem decrescer os resultados, nunca abaixo da argamassa de referência. O ensaio da porosimetria de mercúrio demonstrou que há uma diminuição constante da quantidade de poros de menor dimensão, à medida que a percentagem de terra aumenta, com exceção da argamassa com 10% de terra. A quantidade de poros de maior dimensão aumenta com o aumento da percentagem de terra destacando-se, no entanto, a argamassa com 10% de terra onde se observa uma diminuição da quantidade em relação à argamassa com 5% de terra. Avaliando os ensaios realizados aos provetes em suporte de tijolo verifica-se que a argamassa com 10% de terra conseguiu melhores características, mas a argamassa com 25% de terra é também bastante positiva.

As argamassas ensaiadas no murete de taipa mostraram que a incorporação de terra é vantajosa em vários aspetos. A aplicabilidade é facilitada pela argamassa com terra. Os ensaios de dureza superficial e resistência superficial resultaram em melhores características do que a argamassa de referência. Os ultrassons propagam-se mais rapidamente e a absorção inicial de água é mais lenta na argamassa com terra. Negativamente entra a absorção de água total, que é superior nesta argamassa. O ensaio de porosimetria mostrou a importância de uma cura preferivelmente resguardada da ação da chuva e da água proveniente do solo, para uma melhor distribuição das dimensões dos poros. A argamassa com terra contém mais poros de maiores dimensões, em comparação com a argamassa de cal aérea, mas equipara-se a esta nos poros de menores dimensões.

Os suportes estudados comportaram-se de formas distintas. É importante ter em conta o tipo de suporte e avaliar o comportamento que a argamassa irá ter quando aplicada a suportes de taipa (ou outros). Para este tipo de argamassas pode ser importante a aspersão com água nos primeiros dias de cura, em qualquer um dos suportes; mas tal pode ser obviado se o suporte e as condições ambientes estiverem húmidas.

Relativamente aos ensaios realizados aos provetes prismáticos, aos 90 dias, são vários os ensaios a analisar. O ensaio de condutibilidade térmica mostrou que esta diminui com o aumento da percentagem de terra, excluindo-se a argamassa com 10% de terra. O módulo de elasticidade dinâmico, a resistência à compressão e a resistência à tração por flexão tomam os melhores valores na argamassa com 10% de terra. Todavia, as variações de valores com 25% e 50% de terra não são significativas e são também admissíveis no que toca às exigências referidas. A resistência à tração da argamassa com 50% de terra obteve um resultado muito próximo do limite inferior admissível, podendo não ser a melhor solução. O ensaio de absorção de água por capilaridade é interessante na medida em que a introdução de 5%, 10% e 25% de terra é vantajosa na avaliação do coeficiente de capilaridade. Contudo, a argamassa com 50% de terra é a que detém o menor valor assintótico. Ainda assim a melhor relação entre o coeficiente de capilaridade e o valor assintótico observa-se na argamassa

com 10% de terra. A secagem também mostrou bons resultados de taxa de secagem para a introdução de 5%, 10% e 25% de terra, e neste caso, as argamassas com 5%, 10% e 50% de terra apresentam índices de secagem inferiores. A resistência aos sulfatos é melhor na argamassa com 10% de terra, ficando comprometida nas argamassas com 25% (apenas com um ataque prolongado) e 50% de terra, relativamente à argamassa de referência. Juntando os pontos positivos verifica-se que a argamassa com 10% de terra confere melhores características.

Na generalidade a argamassa com 10% de terra apresentou resultados bastante plausíveis e pode ser utilizada como reboco exterior e interior, mas não possui características de aplicabilidade para tratamento das juntas de assentamento, face à gama exemplificativa de Veiga *et al.* (2011). No entanto, não se encontra longe desta gama, e esta não é restritiva.

Em determinados aspetos a substituição de cal aérea por terra resulta em comportamentos próximos de uma argamassa de traço 1:3; no entanto as melhorias nas resistências mecânicas mostram que o traço volumétrico 1:2 se torna mais forte.

Tendo em conta as conclusões referentes aos resultados obtidos, verificou-se que deveria ter sido aplicada a argamassa com 10% de terra no murete de taipa, visto ser a que demonstrou melhores propriedades. Todavia, observou-se um bom comportamento da argamassa com 25% de terra aplicada no murete e esta argamassa, com maior percentagem de cal por terra, resulta numa maior ecologia face à só com 10% de terra.

Uma parte dos resultados obtidos no presente estudo foram apresentados em poster do CIHEL, com o resumo publicado nas atas de congresso. Outra parte foi submetida a aceite para publicação na conferência CIAV2013 (Anexo A.17). Estão a ser elaborados dois artigos separadamente para os resultados no estado fresco e caracterização no estado endurecido aos 28 dias (aplicação em tijolo cerâmico) e para os resultados no estado endurecido aos 90 dias (aplicação nos prismas, tijolos e murete de taipa), que serão posteriormente submetidos a revistas internacionais.

10.2. Propostas de desenvolvimento futuro

Por forma a dar continuidade ao trabalho realizado há diversas alternativas a seguir, tendo em conta o trabalho desenvolvido e os resultados obtidos.

Em primeiro lugar o estudo das mesmas argamassas mas com diferentes percentagens de terra, nomeadamente entre os 10% e os 25% e entre os 25% e os 50%, onde por vezes foi difícil de perceber o que ocorreria em ambos os intervalos. Ressalta-se prioritariamente o 1º intervalo, uma vez que os valores de 10% foram particularmente interessantes nas aplicações laboratoriais e os valores de 25% apresentaram um bom comportamento no murete.

Podem também ser estudados outros traços correntes como o traço volumétrico 1:3 e 1:4 mas adicionando a terra, em vez de substituindo.

A realização de ensaios a idade mais avançada (180 dias, 1 ano, etc.) deve também ser objeto de estudo.

A adição de fibras, pozolanas ou adjuvantes nestas argamassas pode trazer vantagens em certos aspetos e por isso deve também ser incorporada nas argamassas que resultaram em melhores

comportamentos, com o objetivo de os melhorar ainda mais. Existe já um trabalho em curso com a incorporação de fibras animais e vegetais.

O tipo de cura pode ter efeitos diferentes no desempenho das argamassas, tal como foi verificado na aplicação realizada ao murete de taipa. Como tal, avaliar a influência da cura é também uma vertente interessante de continuação deste trabalho.

Tentar adicionar diferentes quantidades de água, obtendo a mesma gama de espalhamento é também um ponto a ter em conta, nomeadamente quando se verificou que a aplicabilidade da argamassa de 10% de terra não era a que mostrava melhor trabalhabilidade (pouco plástica) mas no entanto obteve, no geral, melhores resultados que a argamassa com 25% de terra, que se mostrou mais trabalhável. Portanto, encontrar a melhor relação água/terra para este tipo de argamassas.

BIBLIOGRAFIA

- Angulo-Ibañez, Q.; Mas-Tomás, Á.; Galvañ-Llopis, V.; Sántolaria-Montesinos, J. L. (2012) – Traditional braces of earth constructions. *Construction and Building Materials*, 30, pp.389-399.
- Arizzi, A.; Cultrone, G. (2012) – Aerial lime-based mortars blended with a pozzolanic additive and different admixtures. *Construction and Building Materials*, 31, pp.135-143.
- ASTM Standards (2008) – Standard test method for rebound hammer of hardened concrete. United States. ASTM C805-08.
- ASTM Standards (2000) – *Standard test method for rubber property – durometer hardness*. United States. ASTM D2240-00.
- Avrami, E. (2008) – Earthen architecture, Sustainability, and Social Justice. *Terra* 2008, pp. 328-330.
- Aymerich, F.; Fenu, L.; Meloni, P. (2011) – Effect of reinforcing wool fibres on fracture and energy absorption properties. *Construction and Building Materials*, 27, pp. 66–72.
- Azeredo, G.; Morel, J.; Lamarque, C. (2008) – Applicability of rehometers to characterizing earth mortar behavior. Part I: experimental device and validation. *Materials and Structures*, 41, pp. 1465-1472.
- Bandeira, A. (2012) – “*Caracterização de argamassas de cal aérea e de cal hidráulica natural com metacaulino. Evolução com a idade.*” Dissertação de Mestrado em Engenharia Civil – Construção, Universidade Nova de Lisboa.
- Bestraten, S.; Hormías, E.; Altemir, A. (2011) – Construcción con tierra en el siglo XXI. *Informes de la Construcción*, 63 (523), pp. 5-20.
- Binici, H.; Aksogan, O.; Shah, T. (2005) – Investigation of fibre reinforced mud brick as building material. *Construction and Building Materials*, 18, pp.313-318.
- Bouhicha, M.; Aouissi, F.; Kenai, S. (2005) – Performance of composite soil reinforced with barley straw. *Cement & Concrete Composites*, 27, pp. 617-621.
- Braga, A.; Rocheta, V. (2007) – A construção em terra e a sustentabilidade. 5º Seminário de Arquitetura em Terra em Portugal, Aveiro (CD).
- Branco, J. P. (1993) – Dicionário técnico de construção civil. Escola Profissional Gustave Eiffel.
- Branco, T. (2013) – “*Evolução e comparação das características de argamassas de cal aérea com adição de metacaulino.*” Dissertação de Mestrado em Engenharia Civil – Construção, Universidade Nova de Lisboa.
- Brito, V.; Gonçalves, T.; Faria, P. (2011) – Coatings applied on damp building substrates: performance and influence on moisture transport. *Journal of Coatings Technology and Research* 8 (4), pp. 513-525.
- Bui, Q.B.; Morel, J.C.; Reddy, B.V.; Ghayad, W. (2009) – Durability of rammed earth walls exposed for 20 years to natural weathering. *Building and Environment*, 44, pp. 912-919.
- Bruno, P.; Faria, P. (2008) – Earth mortars use on Neolithic domestic structures. Some cases studies in Alentejo, Portugal. *Conservar Património*, 8, pp. 5-12.
- Bruno, P.; Faria, P.; Candeias, A.; Mirão, J. (2010) – Earth mortars use on pre-historic habitat structures in south Portugal. Case studies. *J. Iberian Archaeology*, 13, pp. 51-67.

- Cai, Y.; Shi, B.; Ng, C. W. W.; Tang, C. (2006) – Effect of polypropylene fibre and lime admixture on engineering properties of clayey soil. *Engineering Geology*, 87, pp. 230-240.
- Carneiro, J. (2012) – “*Caracterização de argamassas de cal hidráulica natural com metacaulino*”, Dissertação para obtenção do Grau de Mestre em Engenharia Civil – Perfil de Construção; Universidade Nova de Lisboa.
- Castilha, F. I. (2011) – Revestimientos y acabados superficiales en construcciones com tierra contemporâneas. *Informes de la Construcción*, 63 (523), pp 143-152.
- CEN (Comité Européen De Normalisation) (1998) – EN 1015-2: 1998 – *Methods of test for mortars for masonry. Part 2: Bulk sampling of mortars and preparation of test mortars*. Brussels.
- CEN (1998a) – EN 1015-6:1998 – *Methods of test for mortar for masonry - Part 6: Determination of bulk density of fresh mortar*. Brussels.
- CEN (1998b) – EN 1015-7:1998 – *Methods of test for mortar for masonry - Part 7: Determination of air content of fresh mortar*. Brussels.
- CEN (1999) – EN 1015-3:1999 – *Methods of test for mortar for masonry. Determination of consistence of fresh mortar (by flow table)*. Brussels.
- CEN (1999a) – EN 1015-11: 1999 – *Methods of test for mortar for masonry – Part 11: Determination of flexural and compressive strength of hardened mortar*. Brussels.
- CEN (1999b) - prEN 1015-8, draft European Standard, *Methods of test for mortar for masonry – Part 8: Determination of water retentivity of fresh mortar*.
- CEN (2002) – EN 1015-18:2002 – *Methods of test for mortars for masonry. Part 18: Determination of water absorption coefficient due to capillary action of hardened mortar*. Brussels.
- CEN (2009) – EN 15801 – *Conservation of cultural property. Test methods. Determination of water absorption by capillarity*. Brussels.
- CEN (2010) – EN 998-1 – *Specification for mortar for masonry - Part 1: Rendering and plastering mortar*. Brussels.
- Ciano, D; Jaquin, P. (2011) – An overview of some current recommendations on the suitability of soils for rammed earth. *International Workshop on Rammed Earth Materials and Sustainable Structures & Hakka Tulou Forum 2011: Structures of Sustainability at International Symposium on Innovation & Sustainability of Structures in Civil Engineering*.
- Cid, J.; Mazarrón, F. R.; Cañas, I. (2011) – Las normativas de construcción con tierra en el mundo. *Informes de la Construcción*, 63 (523), pp. 159-169.
- Correia, M. (2007) – Teoría de la conservación y su aplicación al patrimonio en tierra, *Apuntes*, 20 (2), pp. 202-219.
- Coutinho, J. S. (2006) – *Materiais de construção 2; 1ª parte – ligantes e caldas 2002, atualização 2006*, FEUP.
- Couto, A. B.; Couto, J. P.; Teixeira, J. M. C. (2006) – Desconstrução: uma ferramenta para a sustentabilidade da construção. *Seminário brasileiro da gestão do processo de projeto na construção de edifícios*, 6, “NUTAU 2006: inovações tecnológicas”, São Paulo, Brasil.
- Crocker, E. (2008) - Recent work in Earthen Architecture. *Terra* 2008, pp.63-67.

- Dias, I. (2013) – “*Desenvolvimento e caracterização de argamassas de cal aérea e terra. A influência da terra como agregado parcial*”. Dissertação de Mestrado em Engenharia Civil – Construção, Universidade Nova de Lisboa.
- Delgado, M.; Guerrero, I. (2006) – Earth building in Spain. *Construction and Building Materials*, 20, pp. 679-690.
- Degirmenci, N.; Baradan, B. (2005) – Chemical resistance of pozzolanic plaster for earthen walls. *Construction and Building Materials*, 19, pp. 536-542.
- Faria, P. (2003) – Estudo comparativo de diferentes argamassas tradicionais de cal aérea e areia. PATORREB 2003 – 1º Encontro Nacional sobre Patologia e Reabilitação de Edifícios, Porto.
- Faria, M. P. (2004) – “*Argamassas de revestimento para alvenarias antigas. Contribuição para o estudo da influência dos ligantes*.” Tese de Doutoramento em Engenharia Civil – Reabilitação do Património Edificado, Universidade Nova de Lisboa.
- Faria, P.; Henriques, F. (2004) – Current Mortars in Conservation: An overview, *Restoration of Buildings and Monument*, 10 (6), pp. 609-622.
- Faria, P.; Henriques, F.; Rato, V. (2008) – Comparative evaluation of lime mortars for architectural conservation. *Journal of Cultural Heritage*, 9, pp. 338-346.
- Faria, P. (2009) – Resistance to salts of lime and pozzolan mortars. *Workshop Repair Mortar for Historic Masonry*, C. Groot, pp. 99-110.
- Faria, P.; Tavares, M.; Menezes, M.; Veiga, R.; Margalha, G. (2010) – Traditional Portuguese techniques for application and maintenance of historic renders. 2nd Conference on Historic Mortars - HMC 2010 and RILEM TC 203-RHM final workshop, pp. 609 – 617.
- Faria, P. (2011) – METACAL. Procedimentos experimentais no âmbito do projeto. Caparica, FCT/UNL, 2011.
- Faria, P. (2012) – Argamassas sustentáveis. 2ª Conferência de Construção e Reabilitação Sustentável de Edifícios no Espaço Lusófono, FCT-UNL.
- Faria, P.; Silva, V.; Flores-Colen, I. (2012b) – Argamassas de cal hidráulica natural e pozolanas artificiais: avaliação laboratorial. 4º Congresso Português de Argamassas e ETICS, Coimbra.
- Faria, P.; Silva, V.; Dias, I.; Jamú, N.; Santos, P. (2013) – Vantagens da utilização de terra argilosa e fibras naturais em argamassas de cal aérea. 2º CIHEL - Congresso Internacional da Habitação no Espaço Lusófono, Lisboa, LNEC, 13-15 Março 2013 (abstract e poster), p.363.
- Faria, P.; Jamú, N.; Dias, I.; Silva, V.; Gomes, I. – Evaluation of air lime-clay based mortars for earthen walls. CIAV2013 – International Conference on Vernacular Architecture, 7º ATP, VerSus. Vila Nova de Cerveira, 16-20 October 2013 (aceite para publicação).
- Fernandes, M. (2012) - Interventions in Portuguese rammed earth architecture - from ignorance to good practices. RESTAPIA2012, nº 49, pp. 309-314.
- Fernandes, M.; Mirão, J.; Velosa, A.; Candeias, A. (2012) - Estabilización de tierra com cal – ventajas y desventajas. TERRA 2012 - XI Conferencia Internacional sobre el Estudio y Conservación del Patrimonio Arquitectónico de Tierra, Comité Científico Internacional del Patrimonio en Tierra (ICOMOS/ISCEAH) e Pontifica Universidad Católica del Perú, pp.11.

- Fratini, F.; Pecchioni, E.; Rovero, L.; Tonietti, U. (2011) – The earth in the architecture of the historical centre of Lamezia Terme (Italy): Characterization for restoration, *Applied Clay Science*, 53, pp.509-516.
- Galán, M.; Rivera-Gómez, C.; Petric, J. (2010) – Clay-based composite stabilized with natural polymer and fibre, 24, pp. 1462-1468.
- Gameiro, A.; Santos-Silva, A.; Faria, P.; Branco T.; Veiga, R.; Velosa, A. (2012) – Physical and chemical assessment of lime-metakaolin mortars: influence of binder:aggregate ratio. (artigo submetido).
- Ghavami, K.; Filho, R. D. T.; Barbosa, N. P. (1999) - Behavior of composite soil reinforced with natural fibres. *Cement and concrete composites*, 21, pp.39-48
- Gomes, M. I.; Faria, P.; Gonçalves, T. D. (2009) - Construções de terra, Causas de degradação. Conferência Internacional PATORREB, Porto, FEUP, pp. 205-210.
- Gomes, M. I.; Faria, P. (2011) – Repair mortars for rammed earth constructions. In *Proceedings of the XII DBMC – 12th International Conference on Durability of Building Materials and Components*, Vol.2, V.P Freitas, H.Covacho, M.Lacasse (eds.), Porto, FEUP, March 2011, p.689-696
- Gomes, M. I.; Lopes, M.; Brito, J. (2011a) – Seismic resistance of earth construction in Portugal. *Engineering Structures*, 33, pp. 932-941.
- Gomes, M. I.; Gonçalves, T. D.; Faria, P. (2012a) – Avaliação da influência do teor de água na trabalhabilidade de argamassas de terra, APFAC, paper 2038 (CD).
- Gomes, M. I.; Gonçalves, T. D.; Faria, P. (2012b) – Earth-based repair mortars: experimental analysis with different binders and natural fibres. RESTAPIA2012, Universidade de Valência.
- Gomes, M. I.; Gonçalves, T. D.; Faria, P. (2012c) – Unstabilised rammed earth: characterization of material collected from old constructions in south Portugal and comparison to normative requirements. *Taylor & Francis, Int J. Architectural Heritage* (on line 23 April 2012 - doi/abs/10.1080/15583058.2012.683133).
- Gomes, M. I.; Gonçalves, T. D.; Faria, P (2012d) – Análise experimental de argamassas de terra com cal e fibras naturais. 4º Congresso português de argamassas, Universidade de Coimbra; pp. 38.
- Goodhew, S.; Griffiths, R. (2005) – Sustainable earth walls to meet the building regulations. *Energy and Buildings*, 37, pp. 451–459.
- Groot, C. (2012) – RILEM TC 203-RHM: Repair mortars for historic masonry. *Performance requirements for renders and plasters*, 45, pp. 1277-1285.
- Guerrieri, C. (2012) – Characterization of compressed earth blocks built with natural low-cost energy stabilizers. RESTAPIA2012, pp. 125-130.
- Hall, M.; Djerbib, Y. (2004) – Rammed earth sample production context, recommendations and consistency. *Construction and Building Materials*, 18, pp. 281-286.
- Hejazi, S. M.; Sheikhzadeh, M.; Abtahi, S. M.; Zadhoush, A. (2012) – A simple review of soil reinforced by using natural and synthetic fibres. *Construction and Building Materials*, 30, pp. 100-116.
- Henriques, F.; Faria, P. (2006) - Argamassas de substituição na conservação do património. *Construção Magazine*, 16, pp. 38-45.
- Henriques F.; Faria, P. (2008) - O papel da investigação no estudo das argamassas de substituição na conservação do património; *Revista Engenharia Civil – Universidade do Minho*, 31; pp. 29-37.

- Henriques, F. (2011) – Comportamento higrotérmico de edifícios; FCT-UNL.
- Hossain, K.M.A. et al. (2011) - Some engineering properties of stabilized clayey soils incorporating natural pozzolans and industrial wastes. *Construction and Building Materials*, 25, pp. 3495-3501.
- Instituto Português da Qualidade (IPQ) (2000) – NP EN 1097-3:2000 – *Ensaio para determinação das propriedades mecânicas e físicas dos agregados – Parte 3: Método para determinação da massa volúmica e dos vazios*. Caparica.
- IPQ (2000a) – NP EN 933-1:2000 – *Ensaio das propriedades geométricas dos agregados – Parte 1: Método de Peneiração*. Caparica.
- IPQ (2001) – NP EN 12370:2001- *Métodos de ensaio para pedra natural. Determinação da resistência à cristalização de sais*. Caparica.
- IPQ (2007) – NP EN 14146:2006 – *Métodos de ensaio para pedra natural. Determinação do módulo de elasticidade dinâmico (através da medição da frequência de ressonância fundamental)*. Caparica.
- IPQ (2008) – NP EN 1936:2008 – *Métodos de ensaio para pedra natural. Determinação das massas volúmicas real e aparente e das porosidades total e aberta*. Caparica.
- IPQ (2011) – NP EN 459-1: 2011 – *Cal de construção. Parte 1: Definições, especificações e critérios de conformidade*. Caparica.
- Jové, F.; Díaz-Pinés, F.; Guerra, J. L.; Olmos, P. (2012) – Rammed earth Wall restoration method using the earth reintegration technique by ramming. *RESTAPIA 2012*, pp. 363-368.
- Keable, R. (2008) – Guides, Codes and Standards for Rammed Earth Structures: An African Case Study. *Terra 2008*, pp. 361-363.
- LNEC (2002) – Ficha de ensaio para revestimentos de paredes – *Ensaio de absorção de água sob baixa pressão*. Lisboa. FE Pa 39.
- LNEC (2010) – Ficha de ensaio para revestimentos de paredes – *Ensaio de avaliação de características mecânicas por ultra-sons*. Lisboa. FE Pa 43.
- Malanho, S; Veiga, R. (2010) – Análise do comportamento mecânico em laboratório e in situ de revestimentos pré-doseados de cimento. *Congresso APFAC 2010*, paper 2012 (CD).
- Margalha, M. G.; (2011) – Argamassas. Documento de apoio às aulas de Conservação e Recuperação do Património, Universidade de Évora.
- Mateus, L. (2006) – “*Caracterização de revestimentos usados em construções de taipa no barlavento algarvio*”, Dissertação para obtenção do Grau de Mestre em Construção; IST, UTL.
- Mattone, M; Bignamini, E. (2012) – Conservation of earthen construction: Earth-gypsum plasters, *RESTAPIA2012*, pp. 687-691.
- Minke, G. (2000) – *Earth Construction Handbook; The building material earth in modern architecture*; pp. 39-52 and pp. 109-111.
- Minke, G. (2006) – *Building with Earth. Design and Technology of a Sustainable Architecture*, WITpress.
- Minke, G. (2011) – Shrinkage, abrasion, erosion and sorption of clay plasters, *Informes de la Construcción*, 63 (532), pp.153-158.
- Moropoulou, A.; Biscontin, G.; Bakolas, A.; Bisbikou, K. (1997) – Technology and behavior of rubble masonry mortars. *Construction and Building Materials*, 11 (2), pp. 119-129.

- Moropoulou, A.; Bakolas, A.; Moundoulas, P.; Aggelakopoulou, E.; Anagnostopoulou, S. (2005) – Strength development and lime reaction in mortars for repairing historic masonries. *Cement & Concrete Composites*, 27, pp. 289-294.
- Muntohar, A. S. (2011) – Engineering characteristics of compressed-stabilized earth brick. *Construction and Building Materials*, 25, pp. 4215-4220.
- Ngowi, A. B. (1997) – Improving the traditional earth construction: a case of study of Botswana. *Construction and Building Materials*, 11, Número 1, pp. 1-7.
- Nwankwor, N. A. (2008) – Justification of Combination of Organic and Inorganic Stabilizers to Stabilize Traditional Earth Materials (Mud) for Quality and Capacity Utilization in Africa. *Terra2008*, pp. 239-246.
- Pascoal, P. (2012) – “*Estudo de Produtos para Conservação de Revestimentos Antigos: Consolidação e Reintegração Cromática*”. Dissertação de Mestrado em Engenharia Civil – Construção, Universidade Nova de Lisboa.
- Pagliolico, S. L.; Ronchetti, S.; Turcato, E. A.; Bottino, G.; Gallo, L. M.; DePaoli, R. (2010) – Physico-chemical and mineralogical characterization of earth for building in North West Italy. *Applied Clay Science*, 50, pp. 439-454.
- Piattoni, Q.; Quagliarini, E.; Lenci, S. (2011) – Experimental analysis and modeling of mechanical behavior of earthen bricks, *Construction and Building Materials*, 25, pp. 2067-2075.
- Pina dos Santos, C. A.; Matias, L. (2006) – Coeficientes de transmissão térmica de elementos da envolvente dos edifícios. ITE 50, LNEC, Lisboa.
- Prabakar J.; Sridhar, R. S. (2002) – Effect of random inclusion of sisal fibre on strength behaviour of soil. *Construction and Building Materials*, 16; pp.123–131
- Prabakar J.; Dendorkarb, N.; Morchhalec, R. K. (2004) – Influence of fly ash on strength behavior of typical soils. *Construction and Building Materials*, 18, pp.263–267
- Pina dos Santos, C. A.; Matias, L. (2006) – ITE50: Coeficientes de transmissão térmica de elementos da envolvente de edifícios. LNEC, Lisboa.
- Pittaluga, D. (2012) – Earth and bricks architecture: For a conservation of stratigraphical traces. RE-STAPIA 2012, pp. 699-703.
- Quagliarini, E.; Lenci, S. (2010) – The influence of stabilizers and natural fibres on the mechanical properties of ancient Roman adobe bricks. *Journal of Cultural Heritage*, 11, pp. 309-314.
- RILEM (1980) – *Water absorption under low pressure. Pipe method. Test n.ºII.4. Recommendations provisoires*. Paris.
- RILEM (1980a) – *Recommended tests to measure the deterioration of stone and to assess the effectiveness of treatment methods. Test n.º II.5 – Evaporation curve*. *Materials & Structures*, 13, 204-207.
- Rodriguez, M. A.; Monteagudo, I.; Saroza, B.; Nolasco, P.; Castro, Y. (2011) – Aproximacion a la patologia presentada en las construcciones de tierra. Algunas recomendaciones de intervencion. *Informes de la Construcción*, 63 (523), pp. 97-106.
- Silveira, D.; Varum, H.; Costa, A.; Martins, T.; Pereira, H.; Almeida, J. (2012) – Mechanical properties of adobe bricks in ancient constructions. *Construction and Building Materials*, 28, pp. 36-44.

- Torraca, G. (2009) - Part 2 – Mortars, Bricks and Concretes: Earth, Gypsum, Lime and Cements; Lectures on Materials Science for Architectural Conservation. The Getty Conservation Institute, Los Angeles, pp. 38-58.
- Torres, C. (2005) – Arquitetura de Terra em Portugal, Introdução. A memória da terra, Argumentum, pp. 12-14.
- Varum, H, Costa, A.; Velosa, A.; Martins T.; Pereira H.; Almeida, J. (2005) – Caracterização mecânica e patológica das construções em Adobe no distrito de Aveiro como suporte em intervenções de reabilitação. Education and Culture Program: Culture 2000, Le case e le città della terra cruda conservazione, significato e decoro urbano, Painel 2: Análise e patologias.
- Veiga, M. R. (1998) – “*Comportamento de argamassas de revestimento de paredes. Contribuição para o estudo da sua resistência à fendilhação*”. Dissertação elaborada no LNEC para obtenção do grau de Doutor em Engenharia Civil pela Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto.
- Veiga, M. R. (2003) – As argamassas na conservação. Atas das 1^{as} Jornadas de Engenharia Civil da Universidade de Aveiro, Coleção Comunicações, LNEC, Lisboa.
- Veiga, M. R. (2003a) – Argamassas para revestimento de paredes de edifícios antigos. Características e campo de aplicação de algumas formulações correntes. Atas do 3^o *ENCORE, Encontro sobre Conservação e Reabilitação de edifícios*. Lisboa, LNEC.
- Veiga, M. R. (2005) – Comportamento de revestimentos de fachadas com base em ligante mineral. Exigências funcionais e avaliação do desempenho. APFAC, Congresso 2005; paper 2020 (CD).
- Veiga, M. R.; Velosa, A. L.; Tavares, M. (2008a) – A cor das argamassas. Revista Construção Magazine, nº 25.
- Veiga, M. R.; Fragata, A.; Velosa, A.; Magalhães, A. (2008b) – Substitution mortars for application in historical buildings exposed to the sea environment. Analyses of the viability of several types of compositions. 1st International Conference: “Construction Heritage in Coastal and Marine Environments”. Lisboa, Laboratório Nacional de Engenharia Civil (LNEC), Lisbon, Portugal, LNEC.
- Veiga, M. R.; Velosa, A.; Magalhães, A. (2009) – Experimental applications of mortars with pozzolanic additions, Construction and Building Materials, 23, pp. 318 – 327.
- Veiga, M. R.; Fragata, A.; Velosa, A. L.; Magalhães, A. C.; Margalha, G. (2010) – Lime-based mortars: viability for use as substitution renders in historical buildings. International Journal of Architectural Heritage, 4, pp. 177–195.
- Walker, P. (1999) – Bond Characteristics of earth block masonry. Journal of materials in civil engineering, Edição de Agosto, pp. 249-256.
- WCED (World Commission on Environment and Development), United Nations (1987) – Our Common Future (Brundtland Report). Forty-second session, Item 83 (e) of the provisional agenda.
- Yetgin, Ş.; Çavdar, Ö.; Çavdar, A. (2008) – The effects of the fiber contents on the mechanic properties of adobes. Construction and building Materials, 22, pp. 222-227.
- Zupančič, D. (2012) – Earthen architecture, an evergreen type of building method. RESTAPIA 2012, pp. 599-604.

ANEXOS

A.1 Resultados obtidos no ensaio de espalhamento das argamassas

Argamassa	Amassadura	Diâmetros medidos (mm)		Espalhamento (mm)	Média (mm)	Desvio-padrão (mm)
CL2	1	145	146	145,5	146,6	1,4
	2	146	147	146,5		
	3	146	147	146,5		
	4	150	146	148,0		
CL2_5t(L)	1	145	146	145,5	147,5	3,0
	2	145	143	144,0		
	3	148	151	149,5		
	4	150	152	151,0		
CL2_10t(L)	1	149	146	147,5	151,6	4,3
	2	148	149	148,5		
	3	152	153	152,5		
	4	160	156	158,0		
CL2_25t(L)	1	144	147	145,5	147,1	3,6
	2	143	144	143,5		
	3	147	148	147,5		
	4	149	155	152,0		
CL2_50t(L)	1	144	144	144,0	145,8	4,0
	2	140	141	140,5		
	3	152	147	149,5		
	4	150	148	149,0		

A.2 Resultados obtidos no ensaio da massa volúmica fresca

Argamassa	Massa volúmica [kg/m ³]	Média [kg/m ³]
CL2	1950	1926
	1902	
CL2_5t(L)	1950	1950
	1951	
CL2_10t(L)	1943	1946
	1949	
CL2_25t(L)	1947	1960
	1974	
CL2_50t(L)	1963	1952
	1942	

A.3 Resultados obtidos no ensaio do teor de ar das argamassas frescas

Argamassa	Teor de ar [%]	Média [%]
CL2	4,50	4,25
	4,00	
CL2_5t(L)	5,00	4,50
	4,00	
CL2_10t(L)	5,00	4,60
	4,20	
CL2_25t(L)	4,80	4,50
	4,20	
CL2_50t(L)	5,00	5,10
	5,20	

A.4 Resultados obtidos no ensaio da retenção de água das argamas-sas frescas

Amassaduras 1 e 2	M de água na amassadura ag (g)	M 8 filtros (g)	M cap+arg (g) (mc)	M 8 filtros (10min)	Massa de água ensaio (ma)	Quantidade de água Retida (%) (R)
CL2	1000	6,406	894,233	12,401	64,041	90,6
CL2_5t(L)	1025	6,437	896,566	11,8	65,765	91,8
CL2_10t(L)	1025	6,426	900,384	14,122	66,408	88,4
CL2_25t(L)	1025	6,355	895,13	13,004	65,523	89,9
CL2_50t(L)	1025	6,395	902,744	13,848	66,806	88,8

Amassaduras 3 e 4	M de água na amassadura ag (g)	M 8 filtros (g)	M cap+arg (g) (mc)	M 8 filtros (10min)	Massa de água ensaio (ma)	Quantidade de água Retida (%) (R)
CL2	1000	6,404	900,093	11,526	65,008	92,1
CL2_5t(L)	1025	6,336	891,208	11,81	64,863	91,6
CL2_10t(L)	1025	6,337	892,356	12,977	65,056	89,8
CL2_25t(L)	1025	6,394	903,921	13,003	67,004	90,1
CL2_50t(L)	1025	6,288	899,4	13,577	66,242	89,0

A.5 Resultados obtidos no ensaio de dureza superficial, aos 28 dias e aos 90 dias das argamassas sobre tijolo

Argamassas (28 dias)	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	Média [Shore A]	DP
CL2	45	65	53	53	50	70	65	45	60	45	55,10	8,85
CL2_5t(L)	50	75	70	45	45	70	60	65	55	55	59,00	10,20
CL2_10t(L)	60	70	73	60	62	55	66	60	75	60	64,10	6,25
CL2_25t(L)	49	65	60	80	59	59	45	45	60	70	59,20	10,45
CL2_50t(L)	50	68	80	62	70	60	78	75	75	55	67,30	9,66

Argamassas (90 dias)	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	Média [Shore A]	DP
CL2	46	60	68	75	65	70	69	54	75	75	65,70	9,23
CL2_5t(L)	65	57	55	49	66	67	71	60	52	52	59,40	7,14
CL2_10t(L)	48	70	48	60	50	88	65	70	65	65	62,90	11,67
CL2_25t(L)	49	70	87	68	58	69	69	57	54	54	63,50	10,67
CL2_50t(L)	46	53	75	38	62	75	19	32	62	62	52,40	17,55

A.6 Resultados obtidos no ensaio de condutibilidade térmica dos provetes de argamassa em suporte de tijolo

Argamassas (28 dias)	λ_1	λ_2	λ_3	λ_4	λ_5	λ_6	Média [W/m.K]	DP
CL2	0,542	0,341	0,495	0,517	0,361	0,620	0,479	0,099
CL2_5t(L)	0,303	0,524	0,333	0,297	0,430	0,383	0,378	0,080
CL2_10t(L)	0,474	0,460	0,469	0,493	0,471	0,276	0,441	0,074
CL2_25t(L)	0,642	0,609	0,625	0,672	0,620	0,540	0,618	0,040
CL2_50t(L)	0,496	0,445	0,617	0,516	0,553	0,470	0,516	0,056

Argamassas (90 dias)	λ_1	λ_2	λ_3	λ_4	λ_5	λ_6	Média [W/m.K]	DP
CL2	0,396	0,508	0,492	0,339	0,451	0,404	0,432	0,058
CL2_5t(L)	0,630	0,329	0,355	0,343	0,468	0,419	0,424	0,104
CL2_10t(L)	0,564	0,644	0,555	0,457	0,515	0,370	0,518	0,087
CL2_25t(L)	0,849	0,759	0,517	0,652	0,548	0,367	0,615	0,159
CL2_50t(L)	0,625	0,597	0,614	0,385	0,590	0,556	0,561	0,082

A.7 Resultados obtidos no ensaio de velocidade de propagação de ultrassons das argamassas sobre tijolo

Argamassas (28 dias)	AB v [m/s]	AC v [m/s]	AD v [m/s]	AE v [m/s]	AF v [m/s]	FB v [m/s]	FC v [m/s]	FD v [m/s]	FE v [m/s]	Média [m/s]	DP [m/s]
CL2	1232,0	1658,1	1160,31	1371,8	1204,8	1265,9	1213,5	1493,3	1283,0	1320,3	152,5
CL2_5t(L)	1369,2	1260,2	1055,9	1137,9	1012,8	1346,9	1207,7	1426,8	1070,6	1209,8	141,8
CL2_10t(L)	1396,0	1373,3	1268,6	1393,3	1264,6	1294,0	1251,8	1531,6	1330,6	1344,9	84,5
CL2_25t(L)	1490,9	1686,0	1260,5	1361,9	1462,4	1513,5	1257,1	1683,6	1438,4	1461,6	147,5
CL2_50t(L)	1335,8	1631,1	1178,1	1363,9	1332,6	1411,6	1238,5	1737,1	1360,7	1398,8	168,0

Argamassas (90 dias)	AB v [m/s]	AC v [m/s]	AD v [m/s]	AE v [m/s]	AF v [m/s]	FB v [m/s]	FC v [m/s]	FD v [m/s]	FE v [m/s]	Média [m/s]	DP [m/s]
CL2	823,8	995,8	805,6	969,6	1094,4	1023,0	835,7	1060,1	817,1	936,1	108,8
CL2_5t(L)	862,0	1178,4	829,3	1058,9	1234,6	1026,6	852,4	1294,0	824,2	1017,8	175,0
CL2_10t(L)	960,0	1252,1	826,1	1013,7	1122,6	963,4	826,8	1301,1	835,1	1011,2	169,5
CL2_25t(L)	825,4	913,9	846,8	1068,7	1229,4	1069,2	869,6	1208,6	862,8	988,3	149,7
CL2_50t(L)	782,4	1216,1	922,1	991,8	1041,8	1016,4	823,3	1242,8	854,3	987,9	153,6

A.8 Resultados obtidos no ensaio de absorção de água sob baixa pressão das argamassas sobre tijolo

28 dias	Tempo para absorver 4 ml (s)						Média (s)	Média (min)	DP (s)	Coef..Abs. [kg/m ² min ^{1/2}]
CL2	-	273	113	39	64	93	116,40	1,94	82,24	5,98
CL2_5t(L)	103	72	125	120	40	60	86,67	1,44	31,49	6,93
CL2_10t(L)	110	83	223	43	50	46	92,50	1,54	63,04	6,71
CL2_25t(L)	48	91	63	160	88	72	87,00	1,45	35,75	6,91
CL2_50t(L)	15	28	18	10	10	14	15,83	0,26	6,12	16,21

28 dias		CL2 (Amassaduras 1 e 2)			CL2 (Amassaduras 3 e 4)			Média (ml)	DP (ml)
Tempo (min ^{1/2})	Tempo (min)	Tubo 1 (ml)	Tubo 2 (ml)	Tubo 3 (ml)	Tubo 1 (ml)	Tubo 2 (ml)	Tubo 3 (ml)		
0,00	0	-	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
2,24	5	-	-	6,50	11,10	9,60	8,30	8,88	1,69
3,16	10	-	-	12,10	20,40	16,30	13,10	15,48	3,24
3,87	15	-	-	20,10	27,10	23,20	17,70	22,03	3,52
5,48	30	-	-	25,80	43,50	36,80	28,20	33,58	7,04
7,75	60	-	-	34,70	65,30	53,80	47,10	50,23	11,08
Coeficiente de absorção total [kg/m²min^{1/2}]				13,50					

28 dias		CL2_5t(L) (Amassaduras 1 e 2)			CL2_5t(L) (Amassaduras 3 e 4)			Média (ml)	DP (ml)
Tempo (min ^{1/2})	Tempo (min)	Tubo 1 (ml)	Tubo 2 (ml)	Tubo 3 (ml)	Tubo 1 (ml)	Tubo 2 (ml)	Tubo 3 (ml)		
0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
2,24	7,40	8,80	6,50	7,50	11,50	9,00	8,45	1,61	7,40
3,16	15,10	13,60	12,20	15,30	20,70	14,20	15,18	2,67	15,10
3,87	22,30	18,10	16,80	22,30	26,60	19,30	20,90	3,26	22,30
5,48	34,60	28,30	24,30	28,50	40,80	30,10	31,10	5,29	34,60
7,75	46,90	43,30	39,60	37,50	62,10	48,10	46,25	8,01	46,90
Coeficiente de absorção total [kg/m²min^{1/2}]				12,43					

28 dias		CL2_10t(L) (Amassaduras 1 e 2)			CL2_10t(L) (Amassaduras 3 e 4)			Média (ml)	DP (ml)
Tempo (min ^{1/2})	Tempo (min)	Tubo 1 (ml)	Tubo 2 (ml)	Tubo 3 (ml)	Tubo 1 (ml)	Tubo 2 (ml)	Tubo 3 (ml)		
0,00	0	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
2,24	5	6,90	8,80	-	10,90	10,30	10,10	9,40	1,43
3,16	10	13,50	10,00	-	19,40	17,10	17,10	15,42	3,30
3,87	15	19,30	14,80	-	24,70	24,00	24,90	21,54	3,94
5,48	30	28,60	25,10	-	37,70	38,00	40,40	33,96	5,98
7,75	60	40,80	43,40	-	57,20	56,90	61,90	52,04	8,35
Coefficiente de absorção total [kg/m²min^{1/2}]				13,99					

28 dias		CL2_25t(L) (Amassaduras 1 e 2)			CL2_25t(L) (Amassaduras 3 e 4)			Média (ml)	DP (ml)
Tempo (min ^{1/2})	Tempo (min)	Tubo 1 (ml)	Tubo 2 (ml)	Tubo 3 (ml)	Tubo 1 (ml)	Tubo 2 (ml)	Tubo 3 (ml)		
0,00	0	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
2,24	5	11,50	5,10	10,10	5,10	6,80	8,30	7,82	2,41
3,16	10	20,30	11,10	16,10	8,60	13,50	12,60	13,70	3,73
3,87	15	24,80	17,00	21,20	13,80	19,40	16,10	18,72	3,60
5,48	30	35,10	28,20	29,50	19,80	29,00	27,30	28,15	4,50
7,75	60	51,00	48,00	41,90	28,80	43,80	42,90	42,73	6,98
Coefficiente de absorção total [kg/m²min^{1/2}]				11,48					

28 dias		CL2_50t(L) (Amassaduras 1 e 2)			CL2_50t(L) (Amassaduras 3 e 4)			Média (ml)	DP (ml)
Tempo (min ^{1/2})	Tempo (min)	Tubo 1 (ml)	Tubo 2 (ml)	Tubo 3 (ml)	Tubo 1 (ml)	Tubo 2 (ml)	Tubo 3 (ml)		
0,00	0	-	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
2,24	5	-	22,80	32,30	34,90	-	30,90	30,23	4,52
3,16	10	-	36,80	48,20	-	-	48,80	44,60	5,52
3,87	15	-	49,90	66,10	-	-	-	58,00	8,10
5,48	30	-	81,90	-	-	-	-	81,90	0,00
7,75	60	-	121,60	-	-	-	-	121,60	0,00
Coefficiente de absorção total [kg/m²min^{1/2}]				32,68					

de cal aérea e terra

A influência da terra como ligante

90 dias	Tempo para absorver 4 ml (s)			Média (s)	Média (min)	DP (s)	Coef. Abs. [kg/m ² min ^{1/2}]
CL2	1368	-	925	1146,50	19,11	221,50	1,90
CL2_5t(L)	317	60	85	154,00	2,57	115,71	5,20
CL2_10t(L)	135	80	475	230,00	3,83	174,69	4,25
CL2_25t(L)	460	260	1092	604,00	10,07	354,60	2,62
CL2_50t(L)	30	35	73	46,00	0,77	19,20	9,51

90 dias		CL2 (Amassaduras 1 e 2)				
Tempo (min ^{1/2})	Tempo (min)	Tubo 1 (ml)	Tubo 2 (ml)	Tubo 3 (ml)	Média (ml)	DP (ml)
0,00	0	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
2,24	5	1,50	0,30	2,70	1,50	0,98
3,16	10	3,80	0,60	6,10	3,50	2,26
3,87	15	6,80	1,20	6,30	4,77	2,53
5,48	30	11,20	2,20	11,90	8,43	4,42
7,75	60	13,70	3,50	15,40	10,87	5,26
Coeficiente de absorção total [kg/m ² min ^{1/2}]				2,92		

90 dias		CL2_5t(L) (Amassaduras 1 e 2)				
Tempo (min ^{1/2})	Tempo (min)	Tubo 1 (ml)	Tubo 2 (ml)	Tubo 3 (ml)	Média (ml)	DP (ml)
0,00	0	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
2,24	5	3,90	11,80	8,92	8,21	3,26
3,16	10	10,50	27,10	15,72	17,77	6,93
3,87	15	15,30	36,70	23,82	25,27	8,80
5,48	30	22,10	53,90	39,72	38,57	13,01
7,75	60	34,30	81,10	-	57,70	23,40
Coeficiente de absorção total [kg/m ² min ^{1/2}]				15,51		

90 dias		CL2_10t(L) (Amassaduras 1 e 2)				
Tempo (min ^{1/2})	Tempo (min)	Tubo 1 (ml)	Tubo 2 (ml)	Tubo 3 (ml)	Média (ml)	DP (ml)
0,00	0	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
2,24	5	6,90	8,50	2,90	7,70	0,80
3,16	10	13,90	12,70	7,20	13,30	0,60
3,87	15	20,10	20,20	8,70	20,15	0,05
5,48	30	30,30	28,00	13,10	29,15	1,15
7,75	60	43,80	46,30	16,30	45,05	1,25
Coefficiente de absorção total [kg/m²min^{1/2}]				12,11		

90 dias		CL2_25t(L) (Amassaduras 1 e 2)				
Tempo (min ^{1/2})	Tempo (min)	Tubo 1 (ml)	Tubo 2 (ml)	Tubo 3 (ml)	Média (ml)	DP (ml)
0,00	0	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
2,24	5	3,30	4,40	1,80	3,17	1,07
3,16	10	7,90	7,10	4,40	6,47	1,50
3,87	15	9,80	12,00	7,80	9,87	1,72
5,48	30	14,00	17,60	12,80	14,80	2,04
7,75	60	18,10	26,40	17,20	20,57	4,14
Coefficiente de absorção total [kg/m²min^{1/2}]				5,53		

90 dias		CL2_50t(L) (Amassaduras 1 e 2)				
Tempo (min ^{1/2})	Tempo (min)	Tubo 1 (ml)	Tubo 2 (ml)	Tubo 3 (ml)	Média (ml)	DP (ml)
0,00	0	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
2,24	5	17,00	17,50	7,80	14,10	4,46
3,16	10	25,20	32,20	14,00	23,80	7,50
3,87	15	31,50	38,30	19,30	29,70	7,86
5,48	30	48,80	57,60	27,30	44,57	12,73
7,75	60	71,30	85,60	40,80	65,90	18,68
Coefficiente de absorção total [kg/m²min^{1/2}]				17,71		

A.9 Resultados obtidos no ensaio de condutibilidade térmica dos provetes prismáticos

Argamassas 90 dias (Amassaduras 3 e 4)	Provete	λ_1 (W/mK)	λ_2 (W/mK)	Média (W/mK)	DP (W/mK)
CL2	N15	0,730	-	0,737	0,012
	N18	0,753			
	N19	0,727			
CL2_5t(L)	N28	0,741	0,698	0,729	0,028
	N23	0,759	0,733		
	N21	0,755	0,686		
CL2_10t(L)	N31	0,733	-	0,765	0,098
	N35	0,665			
	N32	0,898			
CL2_25t(L)	N41	0,740	-	0,734	0,012
	N44	0,744			
	N46	0,717			
CL2_50t(L)	N51	0,635	-	0,688	0,038
	N54	0,722			
	N56	0,708			

A.10 Resultados obtidos no ensaio do módulo de elasticidade dinâmico

Argamassas 90 dias	Provete	Massa (g)	E _d (MPa)	Média _{provete} (MPa)	Média (MPa)	DP (MPa)			
CL2 (foi ex- cluído um dos 3 prove- tes por apre- sentar valo- res muito di- ferentes)	N17	447,844	2858	2843	2902	97			
			2836						
			2820						
			2858						
	N18	447,433	3115	2961					
			3004						
			2886						
			2839						
CL2_5t(L)	N21	435,156	2666	2837	2880	107			
			2935						
			2826						
			2921						
	N22	440,581	3159	2944					
			2869						
			2831						
			2916						
	N23	442,544	2863	2860					
			2849						
			2869						
			2859						
	CL2_10t(t)	N31	444,383	2972			2986	2914	84
				3005					
				2980					
				2986					
N32		441,209	2868	2937					
			2864						
			3034						
			2981						
N33		439,899	2785	2820					
			2862						
			2845						
			2787						

de cal aérea e terra

A influência da terra como ligante

Argamassas 90 dias	Provete	Massa (g)	E _d (MPa)	Média _{provete} (MPa)	Média (MPa)	DP (MPa)
CL2_25t(L)	N41	452,171	2734	2741	2662	69
			2769			
			2711			
			2750			
	N42	447,848	2654	2667		
			2674			
			2683			
			2657			
	N43	444,199	2576	2578		
			2578			
			2598			
			2560			
CL2_50t(L)	N51	438,419	2808	2365	2229	180
			2150			
			2248			
			2252			
	N52	438,692	2148	2137		
			2139			
			2126			
			2135			
	N53	443,494	2150	2185		
			2231			
			2213			
			2145			

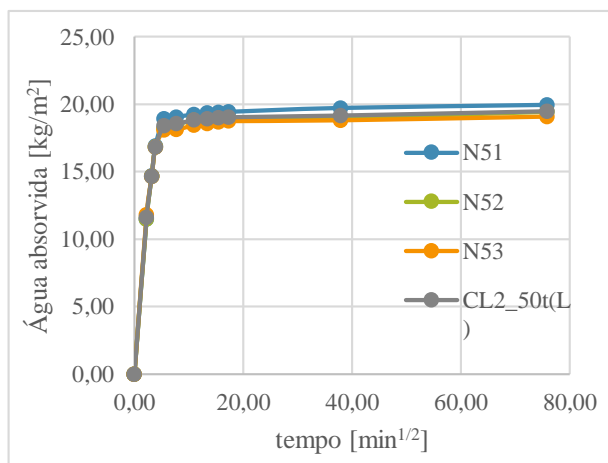
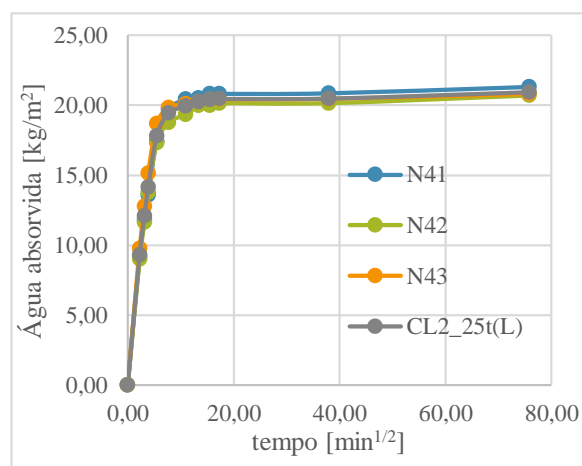
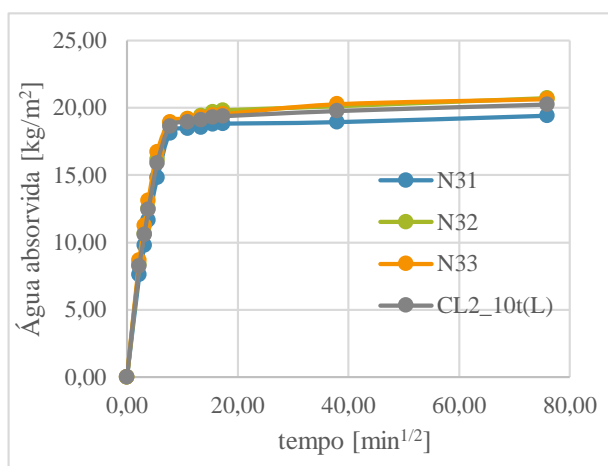
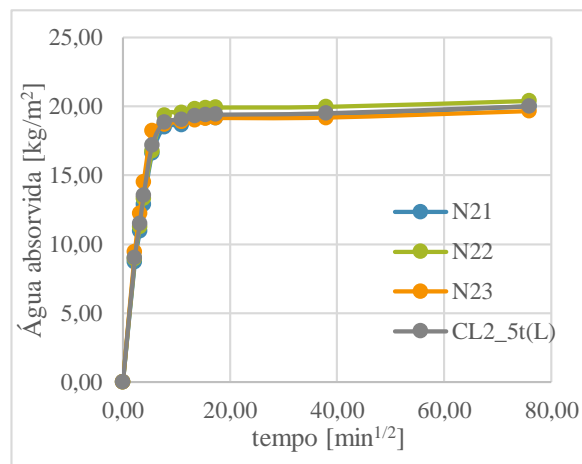
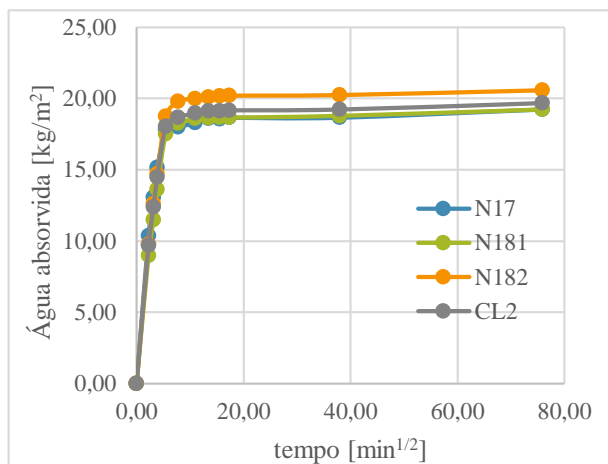
A.11 Resultados obtidos no ensaio de resistência à tração (por flexão) e à compressão

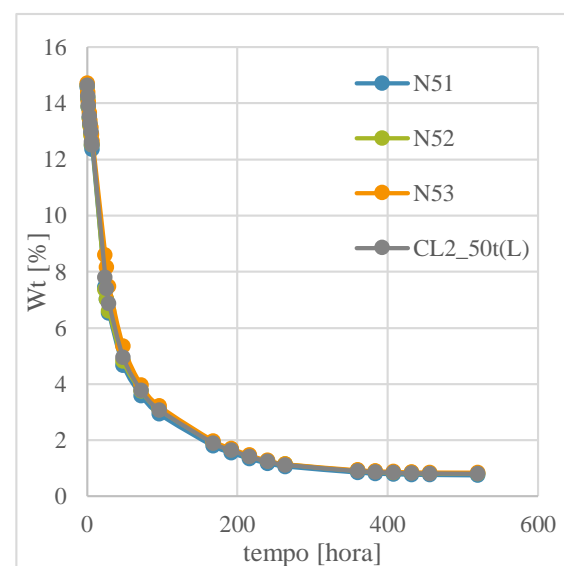
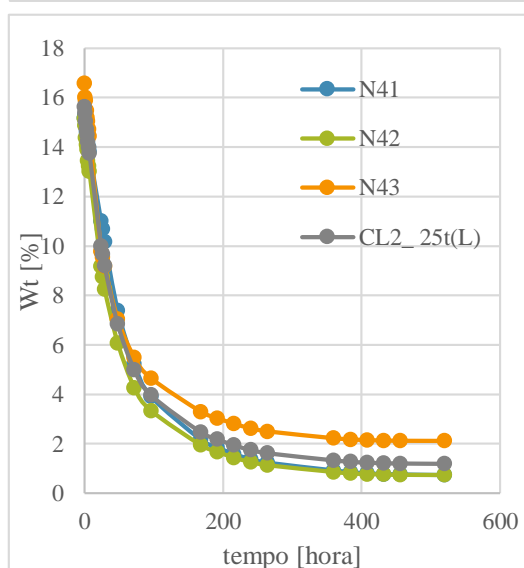
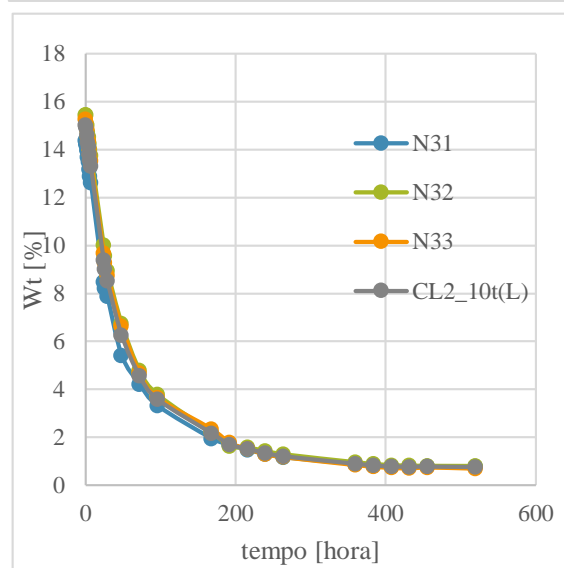
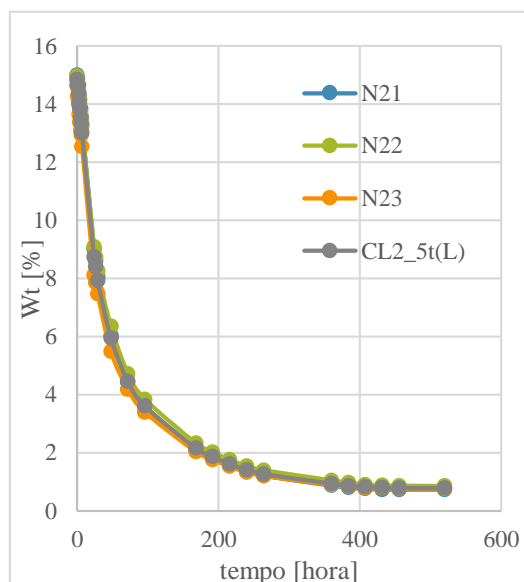
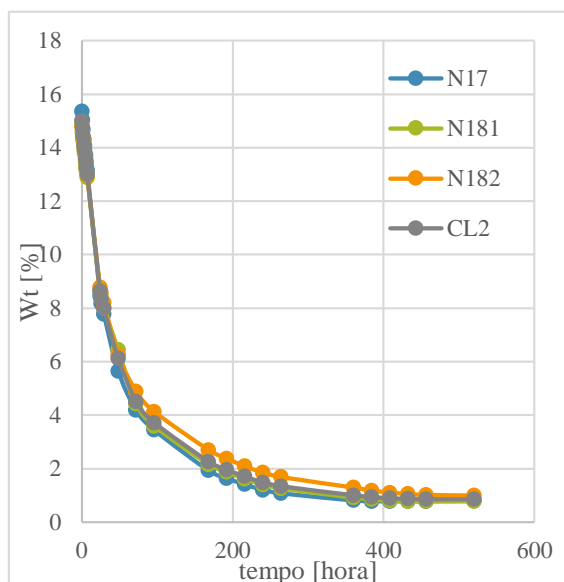
Argamassas 90 dias	Provete	Flexão (N)	Rt (MPa)	Média (MPa)	DP (MPa)	Compressão (N)	Rc (MPa)	Média (MPa)	DP (MPa)
CL2 (foram excluídos dois provetes devido a resultados afastados)	2	51,00	0,12	0,33	0,02	1226,57	0,77	0,70	0,14
	3	41,07	0,10			1335,45	0,83		
	7	130,78	0,31			815,66	0,51		
	8	150,49	0,35			-	-		
CL2_5t(L)	1	144,46	0,34	0,31	0,02	901,87	0,56	0,64	0,06
	2	136,54	0,32			1118,24	0,70		
	3	119,77	0,28			1040,71	0,65		
CL2_10t(t)	1	139,89	0,33	0,35	0,02	1124,68	0,70	0,72	0,02
	2	162,91	0,38			1120,20	0,70		
	3	145,13	0,34			1198,02	0,75		
CL2_25t(L)	1	140,32	0,33	0,31	0,02	974,93	0,61	0,57	0,03
	2	129,73	0,30			861,56	0,54		
	3	122,72	0,29			902,43	0,56		
CL2_50t(L)	1	103,00	0,24	0,24	0,01	874,16	0,55	0,51	0,04
	2	100,65	0,24			739,52	0,46		
	3	106,73	0,25			847,85	0,53		

A.12 Resultados obtidos no ensaio de porosidade aberta e massa volúmica aparente pelo método hidrostático

Argamassas 90 dias	Provete	M1 seca (g)	M2 hidrostá- tica (g)	M3 satu- rada (g)	P.A (%)	Média (%)	DP (%)	MVa (kg/m ³)	Média (kg/m ³)	DP (kg/m ³)
CL2	N12	85,457	47,539	100,847	28,870	29,425	0,799	1603,080	1593,510	17,745
	N13	91,001	50,756	107,32	28,851			1608,815		
	N17	70,874	39,497	84,679	30,554			1568,634		
CL2_5t(L)	N21	59,198	32,879	70,606	30,238	31,027	0,689	1569,115	1551,991	14,572
	N22	69,446	38,565	83,272	30,926			1553,359		
	N23	61,251	34,057	73,999	31,916			1533,499		
CL2_10t(t)	N31	62,427	34,742	74,853	30,979	30,926	0,415	1556,356	1559,782	7,913
	N32	60,011	33,417	71,623	30,393			1570,722		
	N33	57,406	32,038	69,02	31,404			1552,269		
CL2_25t(L)	N41	57,547	32,179	68,234	29,641	30,305	0,612	1596,089	1575,575	21,672
	N42	59,030	33,019	70,261	30,157			1585,038		
	N43	58,963	32,685	70,834	31,117			1545,598		
CL2_50t(L)	N51	58,120	32,336	69,026	29,725	29,694	0,250	1584,083	1578,881	6,110
	N52	62,093	34,407	73,949	29,983			1570,305		
	N53	63,545	35,181	75,342	29,374			1582,256		

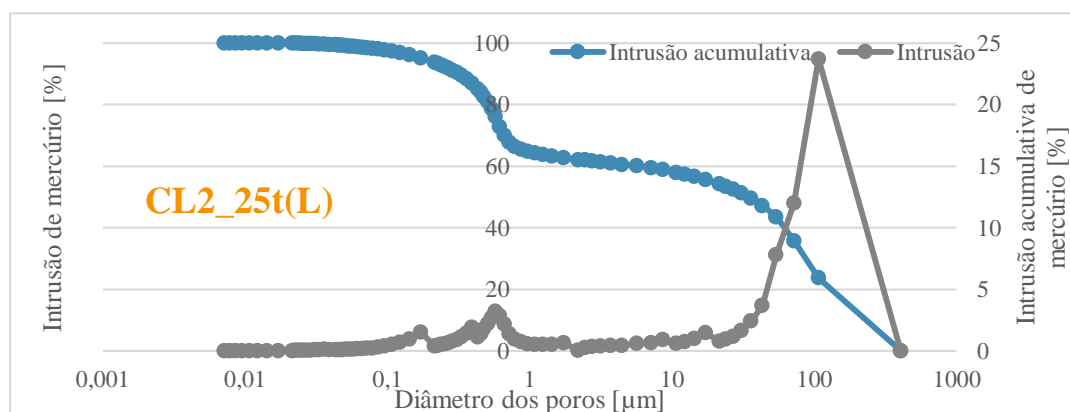
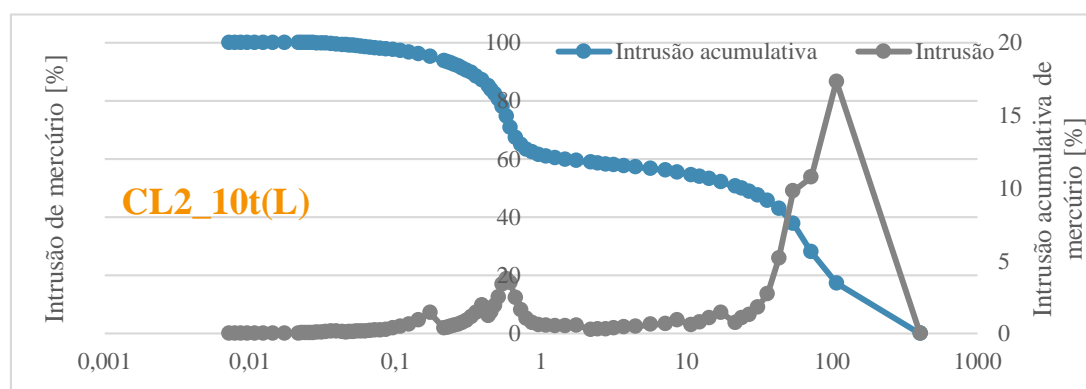
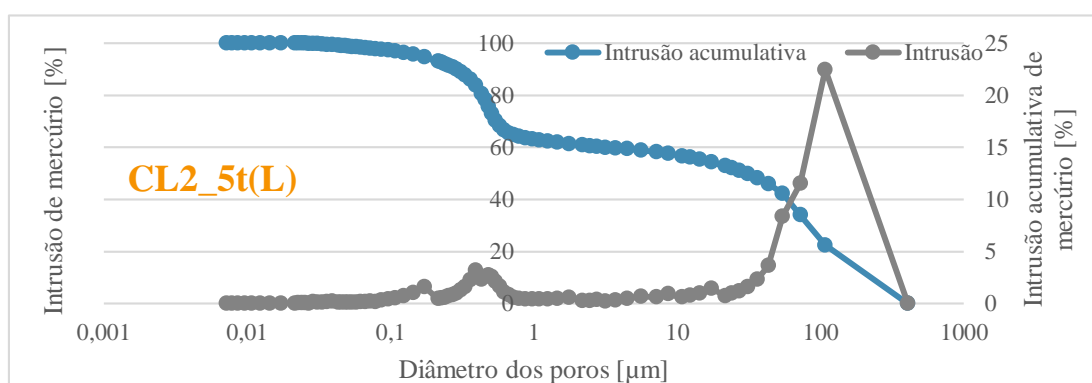
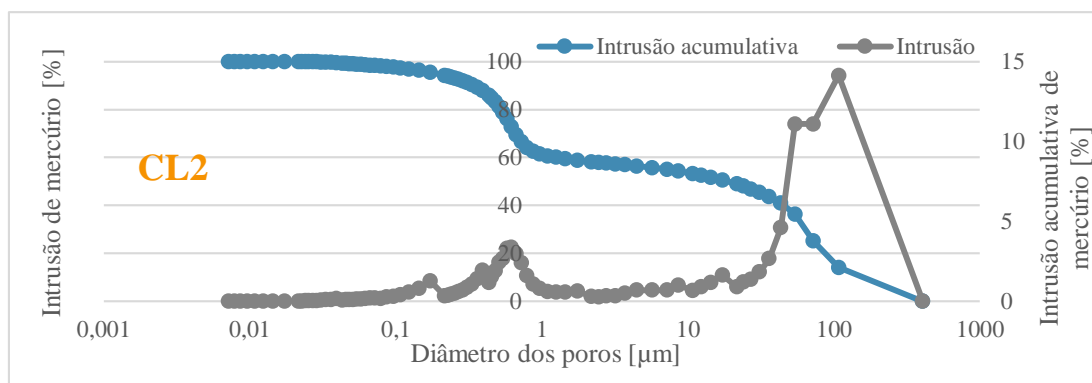
A.13 Resultados obtidos no ensaio de absorção de água por capilaridade

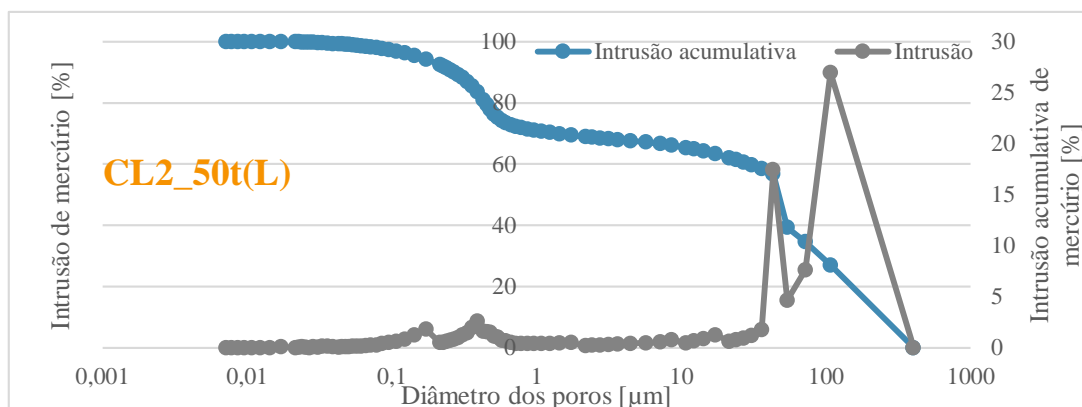


A.14 Resultados obtidos no ensaio de secagem

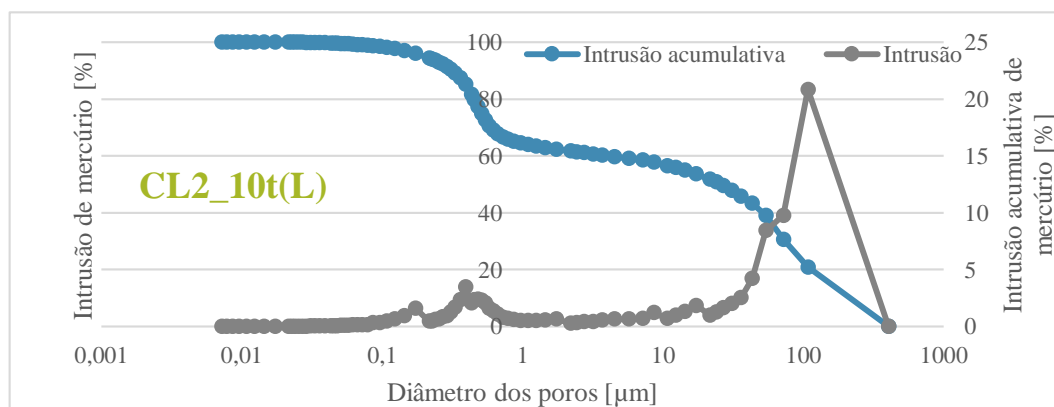
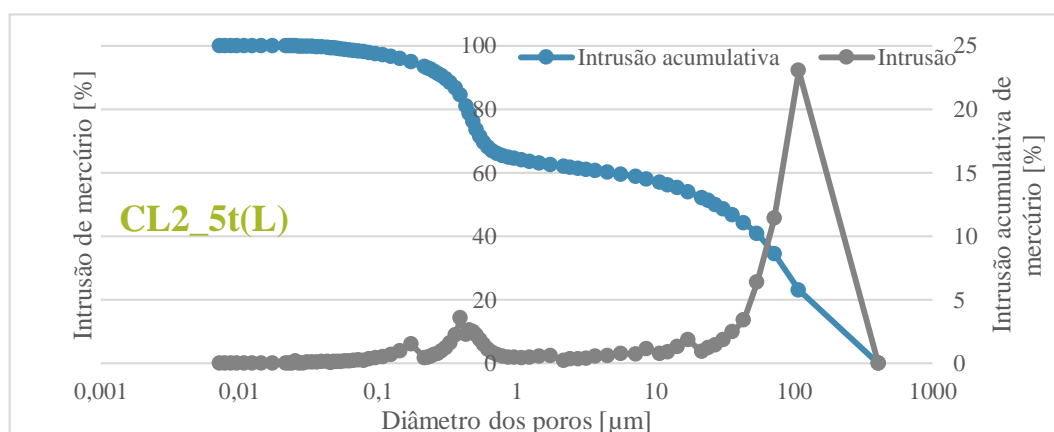
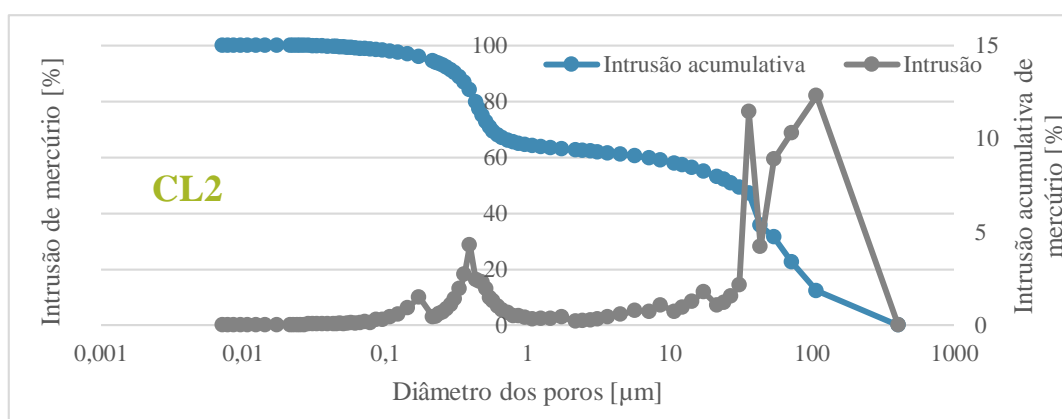
A.15 Resultados obtidos no ensaio de porosimetria de mercúrio

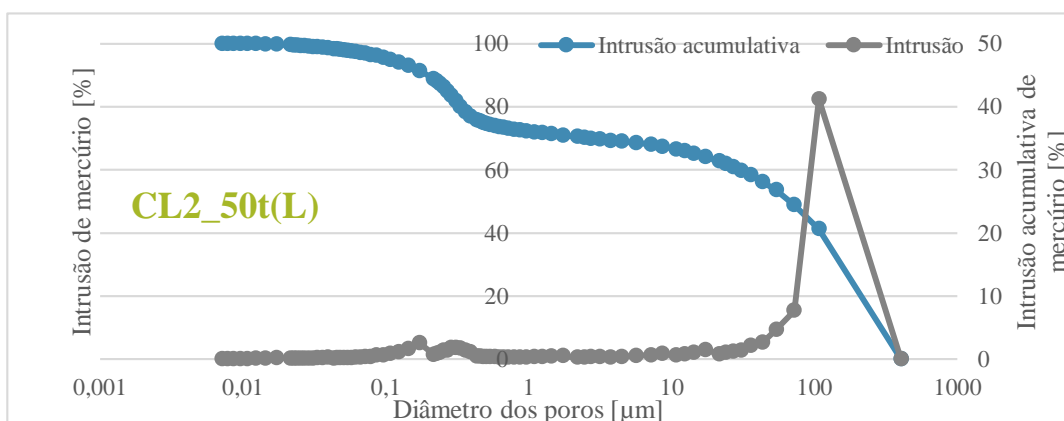
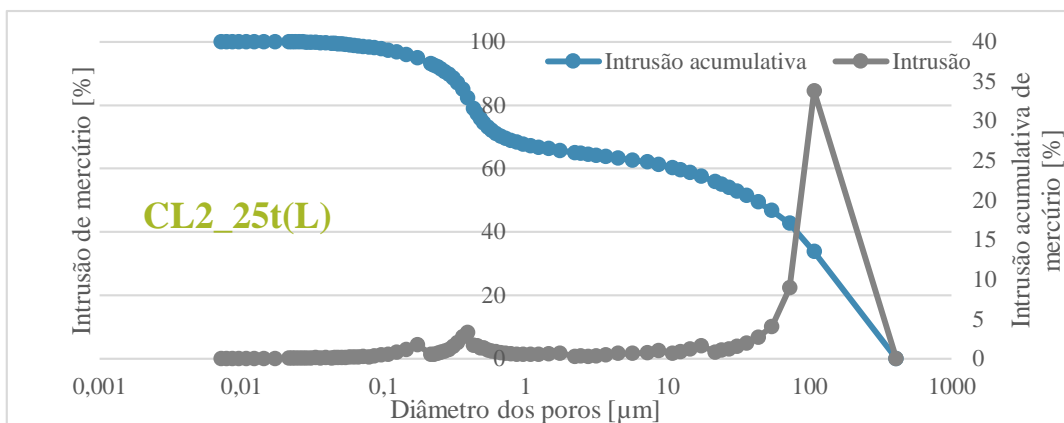
Provetes prismáticos



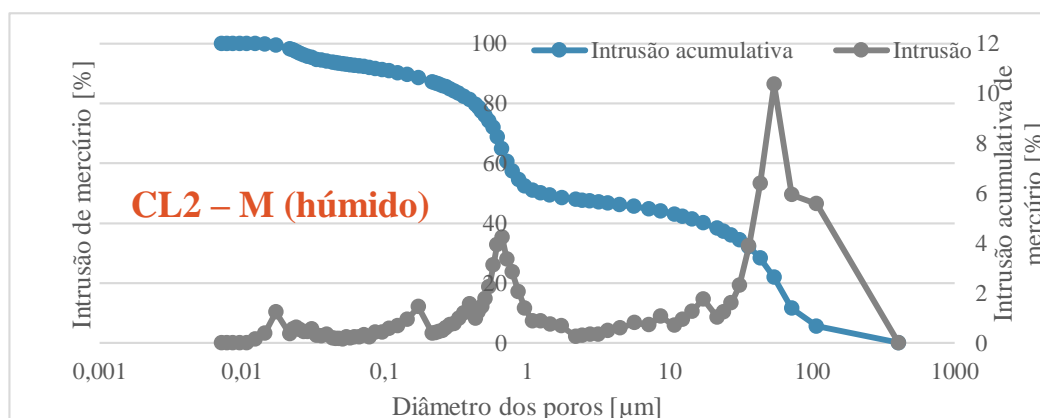
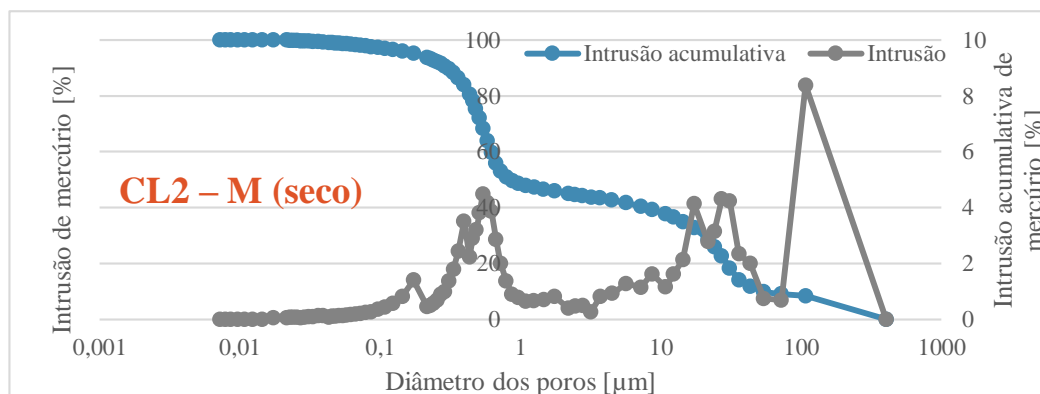


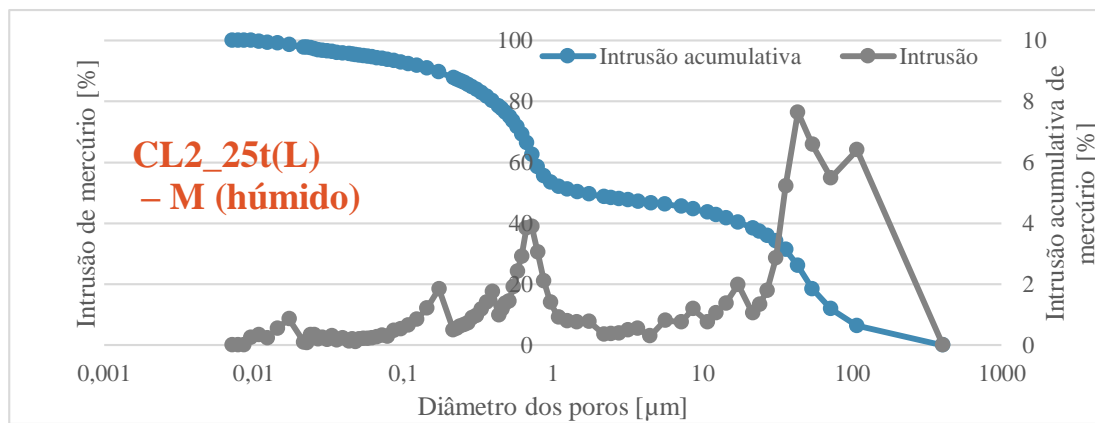
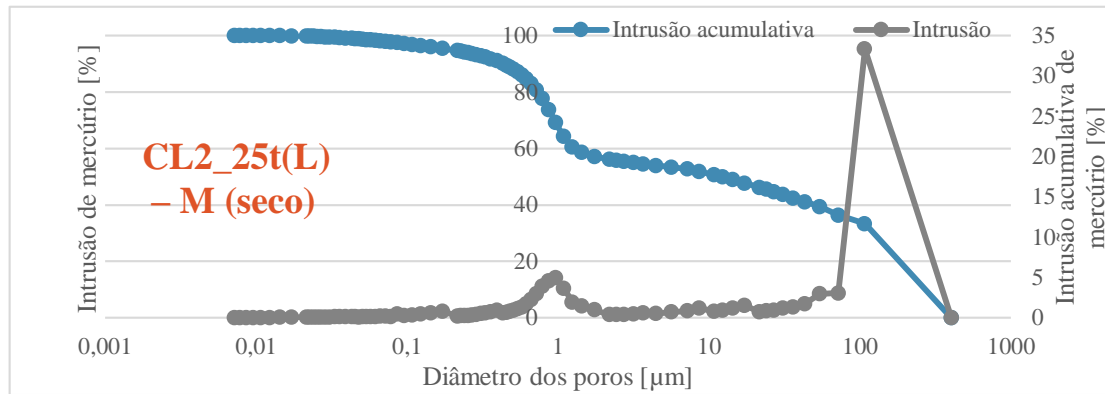
Provetes em suporte de tijolo





Provetes em suporte de taipa





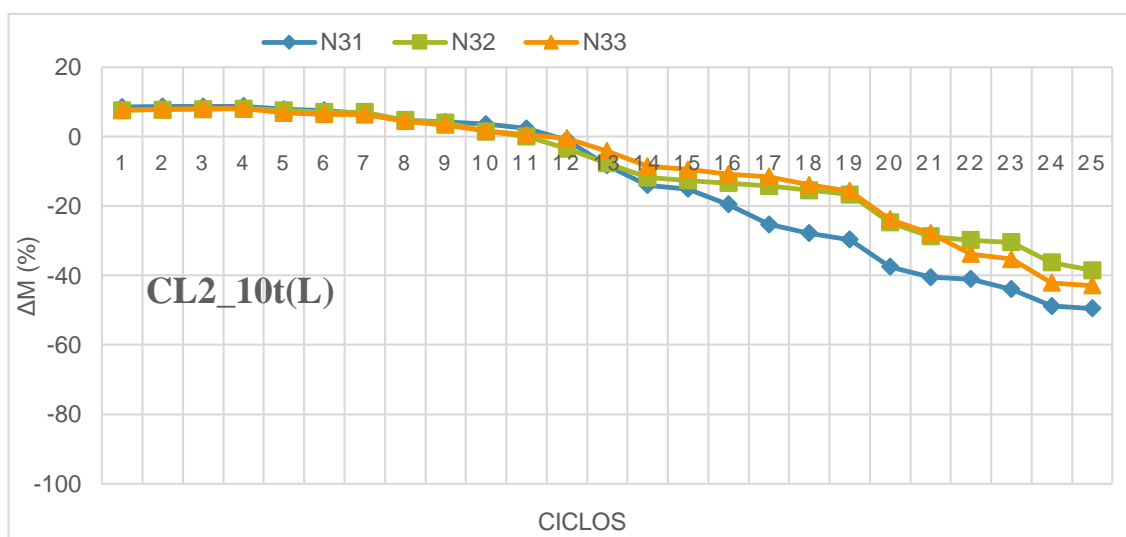
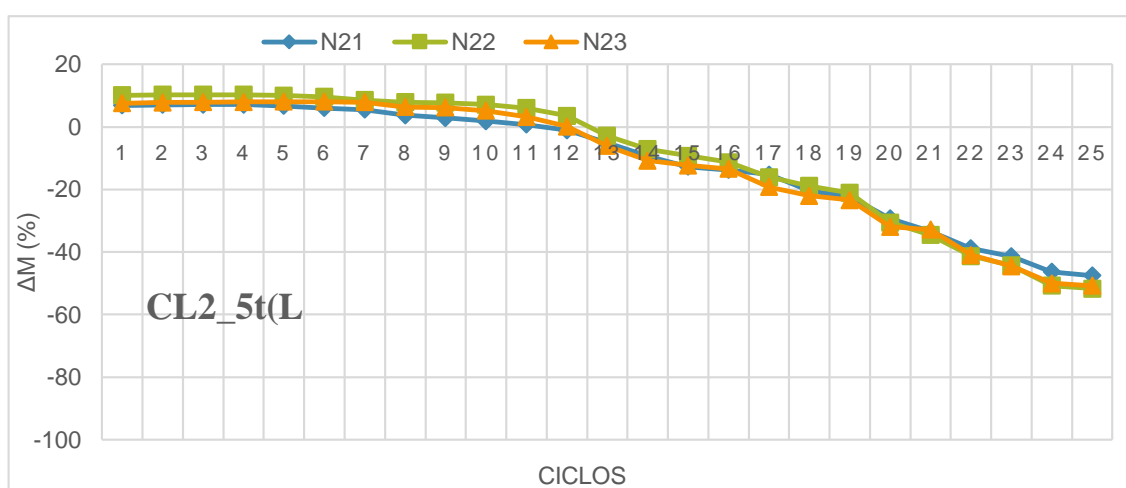
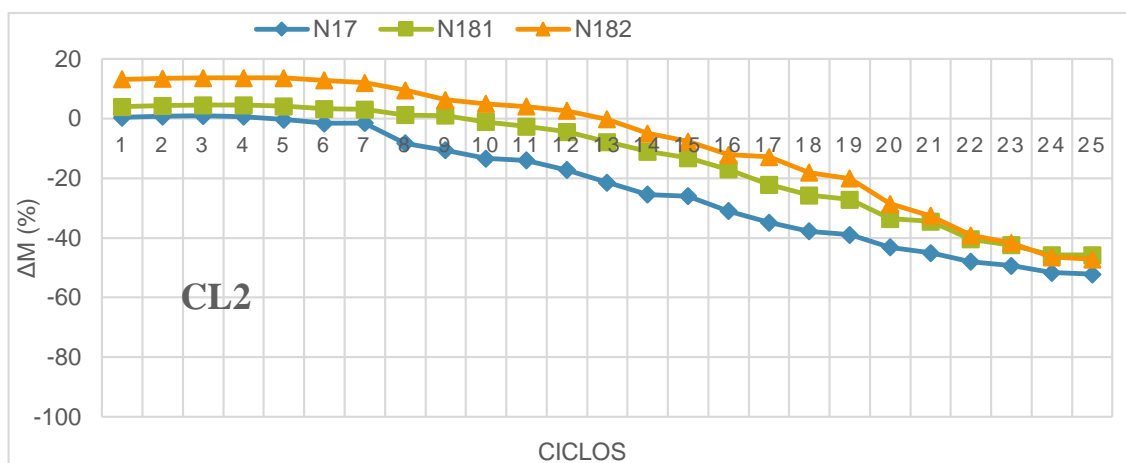
A.16 Resultados obtidos no ensaio de resistência aos sulfatos

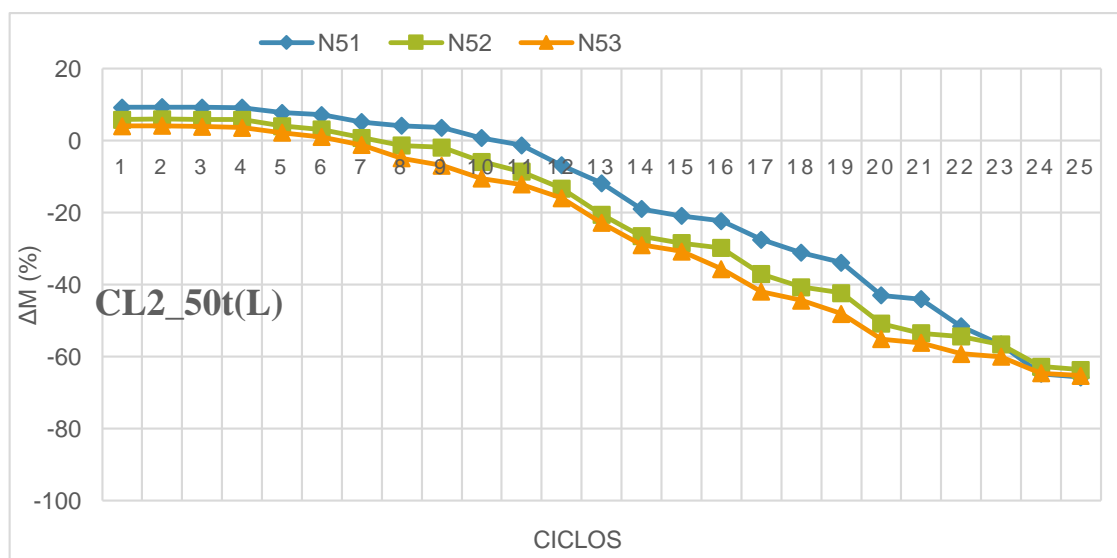
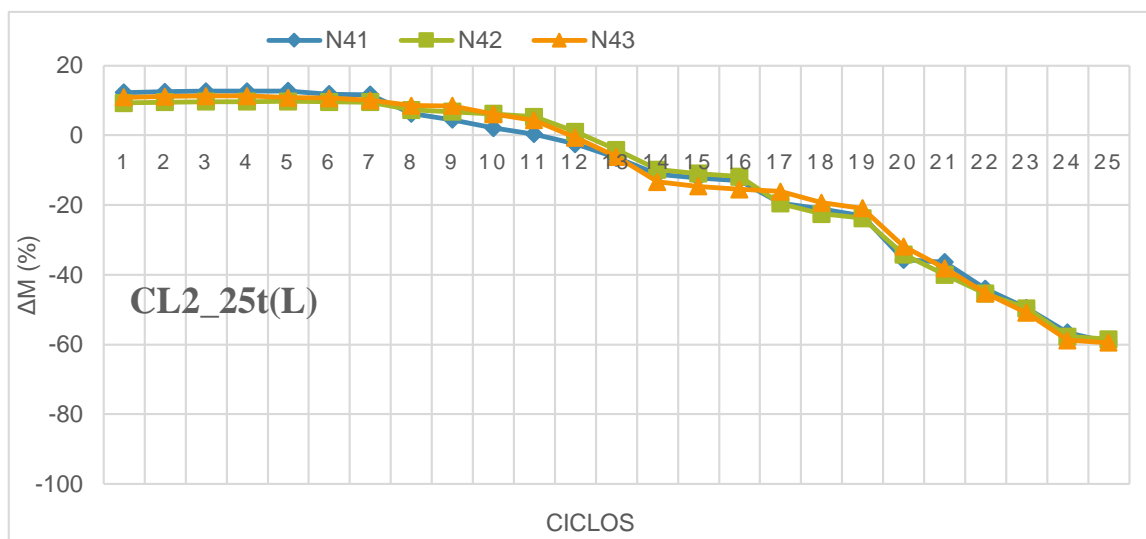
Ciclos (Massa [g])														
	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13
N17	206,490	207,438	208,055	208,381	207,984	205,845	203,218	203,395	189,483	184,686	178,897	177,513	171,027	162,258
N181	213,859	214,835	215,464	215,842	215,868	215,083	213,327	212,890	208,950	208,594	204,126	200,999	197,363	190,280
N182	232,621	233,706	234,305	234,761	234,806	234,789	233,115	231,462	226,250	219,594	216,736	214,981	211,898	205,991
N21	219,748	220,686	221,105	221,324	221,190	220,449	219,000	217,837	214,213	212,444	210,313	207,985	204,403	195,952
N22	226,512	227,445	227,774	227,824	227,785	227,227	226,442	224,277	222,863	222,540	221,302	218,932	213,786	200,730
N23	221,325	222,202	222,599	222,882	223,104	223,129	223,248	222,826	219,655	219,348	217,219	213,071	206,841	193,882
N31	223,277	224,082	224,443	224,381	224,525	222,787	222,045	220,241	216,236	215,253	213,904	211,422	204,572	189,324
N32	221,423	222,228	222,566	222,845	223,134	222,099	221,047	221,107	216,274	214,799	209,464	206,573	199,256	190,608
N33	221,287	222,314	222,843	223,130	223,074	220,568	219,777	219,690	215,652	213,480	210,033	207,563	205,513	197,847
N41	230,829	231,798	232,382	232,612	232,555	232,756	230,850	230,587	219,433	215,727	210,771	207,213	201,320	193,111
N42	224,715	225,666	226,139	226,396	226,395	226,620	226,306	226,132	221,583	220,545	219,246	217,402	208,649	197,828
N43	228,144	229,074	229,513	229,715	229,720	228,906	228,553	227,327	224,122	223,918	218,998	215,428	205,176	193,721
N51	224,760	225,575	225,811	225,668	225,474	222,563	221,304	217,179	215,038	214,056	208,049	203,946	192,493	182,170
N52	217,881	218,516	218,875	218,616	218,580	214,937	212,945	208,155	203,765	202,602	194,395	188,689	179,059	164,114
N53	214,333	214,939	215,026	214,611	214,039	211,052	208,699	204,120	196,427	192,312	184,737	181,474	173,591	159,317

de cal aérea e terra

A influência da terra como ligante

Ciclos (Massa [g])												
	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25
N17	153,949	152,767	142,515	134,592	128,441	125,988	117,317	113,476	107,314	104,538	99,822	98,707
N181	183,643	179,208	171,348	160,807	153,300	150,472	137,119	135,35	122,839	118,825	111,927	111,893
N182	196,222	190,704	181,431	179,941	169,099	165,047	147,532	139,19	125,739	120,371	110,512	109,026
N21	187,079	180,273	178,130	175,166	164,293	160,336	146,076	137,459	126,273	121,032	110,764	108,353
N22	191,936	187,417	183,246	173,370	167,526	162,961	143,352	135,078	121,288	115,043	101,63	99,835
N23	184,286	181,132	178,825	166,837	161,049	158,203	140,606	138,751	121,974	114,513	103,26	101,774
N31	177,580	175,291	166,213	154,246	149,070	145,201	129,007	122,846	121,634	115,627	105,737	104,289
N32	182,157	180,492	178,815	177,116	174,553	171,955	155,413	147,073	144,914	143,675	131,535	126,954
N33	188,846	186,977	184,258	182,628	177,758	174,083	157,238	149,081	136,584	133,675	119,458	117,937
N41	183,398	181,237	179,718	166,523	162,895	158,766	132,850	131,37	115,615	104,251	89,683	84,055
N42	186,126	183,826	182,060	166,141	160,025	157,495	135,975	123,891	112,761	104,003	87,356	85,709
N43	178,921	176,309	174,532	173,309	166,618	163,244	140,640	127,722	112,943	101,32	85,106	83,749
N51	167,342	163,326	160,511	149,701	142,295	136,644	117,796	115,552	100,005	89,55	72,733	70,718
N52	151,664	147,787	144,934	129,945	122,450	119,114	101,564	96,032	94,239	89,581	76,95	75,144
N53	146,649	143,071	132,828	119,865	114,896	107,129	92,702	90,52	84,227	82,552	73,058	71,714





A.17 Poster, Resumo do CIHEL e Artigo aceite no congresso CIAV2013



Vantagens da utilização de terra argilosa e fibras naturais em argamassas de cal aérea

Tema: Tema: Sistemas, processos, tecnologias e materiais de construção

Argamassas de cal aérea, terra e fibras naturais

Tradicionalmente muito utilizadas, em Portugal e pelo Mundo; atualmente utilizadas em muitos países especialmente em países desenvolvidos por questões ecológicas

Vantagens:

- Menor impacto ambiental → ligante menos consumidor de energia face a ligantes hidráulicos; menor incorporação de ligante devido a utilização de terra argilosa; menor utilização de areias por utilização de terra argilosa; utilização de terra argilosa local, minorando necessidades de transporte; controlo de retração pela adição de fibras naturais resultantes de resíduos
- Compatibilidade com edifícios a necessitar de reabilitação de rebocos e de refecimento de juntas e autocoloração, devido aos tons da terra



Campanha experimental

Foram preparadas 2 argamassas de referência de traços volumétricos 1:2 e 1:3, compostas por: Cal aérea cálcica (CL) da LUSICAL e Mistura de 3 Areias siliciosas lavadas e calibradas, na proporção volumétrica de 1 APAS12 + 1,5 APAS20 + 1,5 APAS30.

Realizaram-se argamassas com substituições parciais de massa de cal aérea por terra argilosa no traço volumétrico 1:2 e do agregado fino por terra argilosa no traço volumétrico 1:3. Posteriormente, foram ainda adicionadas fibras naturais (vegetais e animais) às argamassas com 25% e 10% de terra dos traços 1:2 e 1:3 respetivamente.

As fibras utilizadas foram casca de arroz, crina de cavalo e lã de ovelha, cada uma em duas dosagens mássicas distintas. A primeira quantidade de fibra utilizada foi determinada empiricamente, pela massa máxima que possibilitou fácil amassadura, e a segunda correspondeu a metade desta mesma quantidade.

Foram efetuados provetes prismáticos 40x40x160 (mm³) e aplicações sobre tijolo, que foram aspergidos durante 4 dias e submetidos a cura em ambiente controlado (20±2°C e 65±5%HR). Foram aplicadas algumas das argamassas com 25% e 10% de terra num reboco sobre um murete de taipa em exposição natural.



Quadro resumo da composição e consistência das argamassas

Argamassa	Terra [w% CL ou Areia fina]	Fibras [w% CL]	Traço Volumétrico (CL+Terra:Areias)	Traço Ponderal (CL:Terra:Areias)	Rel. Água/(CL+Terra) [-]	Consist. [mm]
CL2	0	0	1:2	1:0.7.7	1.7	147
CL2_50(L)	5	0	1:2	1:0.1.8.1	1.8	150
CL2_100(L)	10	0	1:2	1:0.1.8.6	1.8	155
CL2_250(L)	25	0	1:2	1:0.3.10.3	1.8	150
CL2_500(L)	50	0	1:2	1:1.15.5	1.8	149
CL2_250(L)_0.5FV	25	9	1:2	1:0.3.10.3.0.09	2.0	143
CL2_250(L)_FV	25	18	1:2	1:0.3.10.3.0.18	2.3	146
CL2_250(L)_0.5FACrina	25	5	1:2	1:0.3.10.3.0.05	2.1	145
CL2_250(L)_FACrina	25	10	1:2	1:0.3.10.3.0.10	2.1	147
CL2_250(L)_FALA	25	2	1:2	1:0.3.10.3.0.02	2.3	159
CL2_250(L)_0.5FALA	25	3	1:2	1:0.3.10.3.0.03	2.0	155
CL3	0	0	1:3	1:0.11.6	2.5	151
CL3_50(ArF)	5	0	1:3	1:0.2.11.4	2.1	161
CL3_100(ArF)	10	0	1:3	1:0.4.11.2	1.8	149
CL3_150(ArF)	15	0	1:3	1:0.8.11	1.6	155
CL3_250(ArF)	25	0	1:3	1:1.1.10.5	1.3	147
CL3_100(ArF)_0.5FV	10	10	1:3	1:0.4.11.2.0.10	2.1	150
CL3_100(ArF)_FV	10	21	1:3	1:0.4.11.2.0.21	2.3	142
CL3_100(ArF)_0.5FACrina	10	6	1:3	1:0.4.11.2.0.06	2.1	143
CL3_100(ArF)_FACrina	10	11	1:3	1:0.4.11.2.0.11	2.1	145
CL3_100(ArF)_FALA	10	2	1:3	1:0.4.11.2.0.02	2.3	155
CL3_100(ArF)_0.5FALA	10	4	1:3	1:0.4.11.2.0.04	2.1	148

A campanha experimental continua em curso mas até à data há fortes indícios no sentido de algumas das argamassas estudadas serem muito eficientes para serem aplicadas com vantagens como reboco exterior e interior ou em refecimento de juntas de edifícios antigos ou de paredes de terra

Ensaio de caracterização



Módulo de elasticidade dinâmico

Capilaridade

Resistências à tração e à compressão



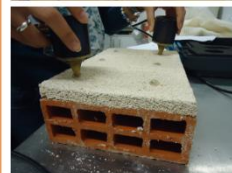
Absorção sob baixa pressão

Secagem

Porosimetria



Avaliação in situ



Ultrassons Condutib. térmica





HABITAÇÃO, CIDADE, TERRITÓRIO E DESENVOLVIMENTO

Congresso Internacional da Habitação no Espaço Lusófono
2º CIHEL - LNEC - LISBOA - PORTUGAL - 13 A 15 MARÇO 2013

VANTAGENS DA UTILIZAÇÃO DE TERRA ARGILOSA E FIBRAS NATURAIS EM ARGAMASSAS DE CAL AÉREA

Advantages of air lime based mortars with clay and natural fibers

Paulina Faria¹, Vitor Silva², Inês Dias³, Naila Jamú⁴, Pedro Santos⁵



Prof. Paulina Faria

DEC – FCT UNL

Portugal

Eng. Vitor Silva

DEC – FCT UNL

Portugal

Lic. Inês Dias

DEC – FCT UNL

Portugal

Lic. Naila Jamu

DEC – FCT UNL

Portugal

Lic. Pedro Santos

DEC – FCT UNL

Portugal

¹Dep. Eng. Civil, Universidade Nova de Lisboa (Prof. Associado, 2829-516 Caparica, paulina.faria@fct.unl.pt)

²Dep. Eng. Civil, Universidade Nova de Lisboa (Bolsheiro, 2829-516 Caparica, vmd.silva@fct.unl.pt)

³Dep. Eng. Civil, Universidade Nova de Lisboa (Mestranda, 2829-516 Caparica, inesmorgadodias@hotmail.com)

⁴Dep. Eng. Civil, Universidade Nova de Lisboa (Mestranda, 2829-516 Caparica, nailaspj@gmail.com)

⁵Dep. Eng. Civil, Universidade Nova de Lisboa (Mestrando, 2829-516 Caparica, pedroacbsantos@hotmail.com)

Palavras-chave: cal aérea, argila, fibras naturais, ligante, agregado, argamassa, caracterização

Resumo

Uma argamassa é tradicionalmente efetuada a partir de uma mistura de agregados finos com um ligante e água. Para utilização em rebocos interiores e exteriores devem utilizar-se argamassas que possuam características que sejam compatíveis com as da parede sobre a qual vão ser aplicadas e com as solicitações a que vão estar sujeitas. Em paredes realizadas com base em terra (através de técnicas de taipa, alvenaria de adobe ou de blocos de terra comprimida) utilizavam-se tradicionalmente argamassas só de terra (em interiores) ou de misturas de terra e cal aérea. Embora recentemente não sejam tão correntes, este tipo de argamassas de terra ou particularmente as mistas são muito utilizadas em alguns países desenvolvidos, como é o caso de vários países do Norte da Europa, particularmente devido a aspetos de sustentabilidade e qualidade do ar ambiente. Noutros países, como é o caso da Escócia, estas argamassas voltaram também a ser usadas para o tratamento e refechamento de juntas de assentamento de alvenarias históricas. A adição de fibras naturais (vegetais ou animais) pode ainda otimizar algumas características deste tipo de argamassas, como sejam através da diminuição da condutibilidade térmica e da suscetibilidade à fendilhação.

Particularmente as argamassas com incorporação de terra são também objeto de projetos internacionais com vista à implementação de cursos profissionais na área, de forma a poderem vir a ser de novo aplicadas por pessoal qualificado. Pelo facto de não se encontrarem devidamente caracterizadas está em curso uma linha de investigação que pretende desenvolver, caracterizar e otimizar este tipo de argamassas com base em cal aérea e argila.

Nesta linha realizaram-se argamassas ao traço volumétrico de 1:2 e 1:3 de cal aérea e areia. A cal aérea utilizada foi a H100 disponibilizada pela LUSICAL. A areia utilizada foi uma mistura de areias siliciosas lavadas e graduadas, constituída por areias de três gamas granulométricas distintas, que tem vindo a ser utilizada nos projetos METACAL e LIMECONTECH. Nas argamassas ao traço 1:2 procedeu-se à substituição gradual de cal aérea por uma terra argilosa (disponibilizada pela SORGILA e escolhida entre argilas com baixa expansibilidade) em quatro dosagens até 50%; nas argamassas ao traço 1:3 procedeu-se à substituição gradual da areia mais fina da mistura por argila, em quatro dosagens até 25%, ou pela adição simples de argila. Nas argamassas mistas que no estado fresco se revelaram como mais interessantes (25% em substituição no caso do traço 1:2 e 10% em adição no caso do traço 1:3), procedeu-se ainda à adição de três tipos de fibras naturais, cada uma em duas dosagens: casca de arroz, *blouces* de lã de ovelha com pelo morto (resíduo da indústria têxtil, disponibilizado pela MULTILÁS) e crina de cavalo; apenas esta última teve de ser previamente cortada.

Todas as argamassas foram caracterizadas no estado fresco, tendo-se registado genericamente uma boa trabalhabilidade e alguma variabilidade face à água. A utilização de algumas das fibras por vezes implicou alterações no procedimento de mistura, mas que poderão facilmente ser implementados em obra.

Foram preparados provetes prismáticos para ensaios de caracterização mecânica, física e química, e também provetes com aplicações sobre a superfície de tijolos, também para incluir a influência da sucção do suporte para caracterização quanto à retração, à dureza superficial e à absorção de água. Todos os provetes foram submetidos a curas em ambiente controlado a 65% de humidade relativa e 20°C de temperatura, com aspersão diária durante os primeiros dias. As argamassas que se revelaram mais interessantes em ensaios preliminares foram aplicadas sobre um murete de taipa em ambiente exterior, no Departamento de Engenharia Civil da Universidade Nova de Lisboa, e sobre elas decorre uma campanha de caracterização do mesmo tipo da efetuada sobre tijolo mas a uma escala mais próxima da real. Na aplicação sobre o murete aplicou-se um salpisco da mesma argamassa um pouco mais fluida e depois uma camada de base com a mesma quantidade de água utilizada nos provetes; também se procedeu a aspersão diária durante os primeiros dias de aplicação.

Através da caracterização entretanto efetuada aferiu-se desde já, e de uma forma sistematizada, a viabilidade destas argamassas mistas de cal aérea e argila, eventualmente com fibras naturais, o que comprova o seu uso muito corrente no passado e abre boas perspectivas para uma mais abrangente e renovada utilização no futuro. Em função das características observadas, a sua utilização não tem de restringir-se à aplicação em paredes realizadas com base em terra, mas pode estender-se a outros suportes, nomeadamente a paredes de alvenaria argamassada antigas, tão frequentes também no património arquitetónico do espaço lusófono e, na maioria dos casos, com necessidades de intervenção com vista à sua conservação e manutenção prementes.

Estas argamassas apresentam vantagens económicas, técnicas e ambientais. São vantagens ambientais e económicas poderem utilizar-se menores teores de ligante produzido especificamente, substituindo-o parcialmente por terra argilosa do local, ou menores teores de areia fina explorada e transportada, substituindo-a parcialmente pela terra argilosa, ou traços mais fracos em ligante, adicionando complementarmente terra argilosa, ou ainda a adição de fibras que são resíduos agroindustriais. São vantagens técnicas a obtenção de uma boa trabalhabilidade, uma retração controlada, uma menor condutibilidade térmica e uma compatibilidade com uma grande gama de suportes. Mas estas argamassas apresentam ainda a vantagem de se apresentarem naturalmente pigmentadas, o que pode ser muito interessante para determinados tipos de aplicações, nomeadamente em rebocos e no tratamento de juntas. Pretende-se, através de poster, dar conta desta linha experimental e de alguns dos resultados obtidos.

Agradecimentos

Agradece-se o financiamento aos projetos LIMECONTECH, PQREN/216586/2011 e PIRATE – ECVET Earthbuilding Europe, e às empresas Lusical, Sorgila e Multilás pela disponibilização de materiais.

Referências bibliográficas

- Faria, P. – Argamassas sustentáveis. II CRSEEL – Conferência de Construção e Reabilitação Sustentável de Edifícios no Espaço Lusófono. Caparica, FCT UNL, 26-27 Abril 2012 (CD-rom).
- Faria, P.; Amado, M.P.; Cartaxo, F. – Produção local de materiais para a sustentabilidade da construção. Congresso Luso-Moçambicano de Engenharia (CLME 2011), J. Silva Gomes et al. (Ed.), Maputo, Setembro 2011, 373-378.